



**UNIVERSIDAD DON BOSCO
VICERRECTORÍA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“DETERMINACIÓN DE CAUDAL ECOLOGICO PARA PCH EN EL SALVADOR, CON
BASE A LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS POR EL MINISTERIO DE MEDIO
AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES”.**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO EN GESTION DE LAS ENERGIAS RENOVABLES

ASESOR

ERICK BLANCO GUILLEN

PRESENTADO POR

RUDY WILFREDO MERLOS ORTIZ

**Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, Centroamérica.
JULIO 2017**

AGRADECIMIENTOS

Gracias infinitas a DIOS todopoderoso por darme la Sabiduría necesaria y el coraje para enfrentar este nuevo reto, a mis padres Juana Merlos y José Alberto por demostrarme siempre su apoyo incondicional, a mis hermanas Marlene y Karla (Q.D.D.G) por sus consejos, a mis sobrinos que siempre estuvieron pendiente por este logro.

En especial a mi bella esposa Ruth Noemí y Matías Alessandro por ser la inspiración en todo momento, gracias por aguantar a mi lado las noches de desvelo y la paciencia que me tuvieron durante la preparación de esta etapa final de mi trabajo de graduación.

Gracias a mi asesor y amigo Erick Blanco por sus consejos y apoyo incondicional, al Ing. Roberto Saravia por dedicar parte de su tiempo en la revisión de este documento.

A mis amigos Dr. Federico Machado, a los Ingenieros Eduar Aguirre, Elix Umaña, Wilfredo Aguilera, José Luis Franco, Wilfredo Monroy, que siempre estuvieron pendientes de la finalización de este trabajo de tesis.

Al Mg. Héctor Romero por los lineamientos académico - administrativos que se dieron en el proceso de este trabajo.

A todos los que han sido parte de una u otra forma de este nuevo triunfo, gracias.

Ing. Rudy Merlos.

Índice General.

Resumen

Capítulo 1: Generalidades	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Definiciones e indicadores de calidad del agua.	1
1.2.1. Indicadores de calidad del agua.	3
1.3. ¿Por qué es necesario un caudal ecológico?	3
1.4. Caudales ecológicos y los aprovechamientos hídricos.	4
1.5. Cómo se hace en la actualidad el dimensionamiento de un caudal ecológico para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH).	5
1.6. Marco legislativo actual en El Salvador en lo relativo a la gestión de agua y medio ambiente.	6
Capítulo 2. Metodología a nivel mundial para cálculo del caudal ecológico.	10
2.1. Métodos matemáticos.....	10
2.2. Métodos hidrobiológicos.....	10
2.3. Conceptualización general de cada uno de los métodos para determinar el caudal ecológico.	11
2.3.1 Porcentajes fijos.	11
2.3.2. Fórmulas de Matthey.....	11
2.3.3 Método suizo.	11
2.3.4. Método de Tennant o método de Montana. Método de Tessman y otros similares.....	13
2.3.5. El método de Arkansas (1987).	14
2.3.6. El método de Texas (Trans-Texas Method, 1974).	14
2.3.7. Análisis de la frecuencia de caudales (Flow Duration Curves).	15
2.3.8. El método de Hoppe.	15
2.3.9. El método RVA (Range of Variability Approach, Richter et al, 1997).	15
2.3.10 Método Asturiano.....	16
2.3.11. Método Navarro.	17
2.3.12. Método Vasco.	17
2.3.13. Método del caudal base.	18
2.3.14. Análisis del hábitat y análisis por transectos.....	19
2.3.15. Método del perímetro mojado.	19
2.3.16. Método de conservación de los hábitats de Nehring.....	21
2.3.17. Método de Fleckinger.....	21
2.3.18. Método de García Dávila.	21
2.3.19. Análisis incremental.	23
2.3.20. Método de microhábitats.....	23
2.3.21. Metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology).	24

2.4. Otros métodos.	24
2.4.1. Métodos Holísticos.....	25
2.5 Ubicación de caudales ecológicos en El Salvador.	25
Capítulo 3. Estudio de Caso de Estimación del Caudal Ecológico en el río Sensunapán o Grande de Sonsonate.	32
3.1 Introducción.	32
3.2. Datos generales.	32
3.3. Datos hidrometeorológicos.	37
3.4. Datos sobre calidad de las aguas del río.....	42
3.5. Aprovechamientos.....	45
3.5.1. Aprovechamiento hidroeléctrico.	45
3.6. Riesgos ambientales. (Proyecto USAID – Manejo de cuencas hidrográficas. (febrero.2009).	53
3.6.1. Riesgo de inundaciones.....	53
3.6.2. Riesgos por contaminación ambiental.....	55
3.7. El marco normativo.....	55
3.8. Métodos que definen un caudal mínimo continuo para todo el año.....	63
Los métodos que no definen un régimen propiamente dicho, sino sólo un caudal mínimo fijo que servirá de límite inferior que no debe rebasarse.	63
3.9. Métodos que definen un caudal mínimo para cada mes.....	63
3.10. Métodos que proporcionan un régimen de caudales completo.....	64
3.11.Métodos basados en la variabilidad natural del río.	64
3.12. Resultados.	65
3.13. Propuesta de metodología aplicable a proyectos nuevos sobre Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en El Salvador.	76
3.14. Metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology).	79
3.15. Ventajas y desventajas de Tennant e IFIM.	80
Conclusiones.	84
Referencias bibliográficas.....	88

Índice de figuras

Figura 1. Caudal ecológico PCH Sensunapán.....	6
Figura 2. Variación del perímetro mojado en función del caudal circulante. Construcción propia....	20
Figura 3. Zonas de mayor sensibilidad ante la disminución de caudal (zonas críticas).....	22
Figura 4. Ubicación de caudales ecológicos en El Salvador. Fuente: Elaboración del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias.	25
Figura 5. Esquema de procedimiento genérico para encontrar el caudal ecológico. Fuente: EcoHyd, 2011	31
Figura 6. Ubicación de la región hidrográfica Grande de Sonsonate-Banderas dentro del territorio de El Salvador.	33
Figura 7. Distribución de municipios y red de drenaje en la cuenca del río Sensunapán.	34
Figura 8. Distribución de los rangos de pendientes en la cuenca del río Sensunapán.	35
Figura 9. Perfil del río Sensunapán (los ejes representan el rango altitudinal y la longitud total atravesada por el cauce del río).	36
Figura 10. Municipios y cantones localizados dentro de la cuenca del río Grande de Sensunapán. ..	37
Figura 11. Escorrentía superficial (mm) en cuencas de las regiones hidrográficas Cara Sucia – San Pedro y Sonsonate – Banderas. (Servicio Hidrológico Nacional Balance Hídrico Integrado y Dinámico - 2005)	39
Figura 12. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Sensunapán. Fuente: Análisis hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad, en el departamento de Sonsonate, El Salvador.....	41
Figura 13. Estaciones climatológicas de El Salvador en la cuenca del río Sensunapán. Fuente: Análisis hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad, en el departamento de Sonsonate, El Salvador.....	41
Figura 14. Aprovechamiento del agua de los sitios evaluados en los ríos de la región hidrográfica del río Grande de Sonsonate.	44
Figura 15. Ubicación y características de las centrales hidroeléctricas construidas en el río Sensunapán.	48
Figura 16. Distribución de caudales medios mensuales en los puntos de toma de las centrales. (SNET, 2005).....	50
Figura 17. Producción de las centrales hidroeléctricas existentes en la cuenca del río Grande de Sensunapán.....	52
Figura 18. Mapas de riesgo de inundación en la cuenca del río Sensunapán para diferentes duraciones de lluvias y periodos de retorno	55
Figura 19. Aportaciones mensuales en régimen no alterado en la estación de Acajutla, por tipo de año (húmedo, medio o seco).	59
Figura 20. Curva de caudales clasificados en la serie de aforos de la estación de Acajutla.	62
Figura 21 Representación gráfica de los valores medianos mensuales y de los rangos inferiores y superiores para cada mes tras la aplicación del método RVA.	70

Figura 22. Representación gráfica de los rangos de variabilidad natural calculados para los meses de enero, febrero, marzo y abril en la estación de aforos de Acajutla.	71
Figura 23. Representación gráfica de los rangos de variabilidad natural calculados para los meses de mayo, junio, julio y agosto en la estación de aforos de Acajutla.	72
Figura 24. Representación gráfica de los rangos de variabilidad natural calculados para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre en la estación de aforos de Acajutla.	74

Índice de tablas

Tabla 1.- Caudales mínimos según el método de Tennant (1976).	13
Tabla 2. Estadística hidrológica por departamento año 2014 en El Salvador. (MARN, 2014)	25
Tabla 3. Distribución de áreas de pendientes en la cuenca del río Sensunapán.	34
Tabla 4. Distribución de la población entre los diferentes municipios ubicados en la cuenca del río Sensunapán (datos del censo de 2007 – fuente: MARN).	36
Tabla 5. Rango de precipitación anual (mm) en los municipios de la cuenca del río Sensunapán (Fuente: MARN).	38
Tabla 6. Caudales registrados en la central hidroeléctrica de Juayúa.	39
Tabla 7. Caudales registrados por el Observatorio Ambiental del MARN en diferentes secciones del río Sensunapán	40
Tabla 8. Sitios de muestreo de calidad de agua.	43
Tabla 9. Resultados de los parámetros de calidad de agua, año 2011.	43
Tabla 10. Resultados de los parámetros de calidad de agua para calcular el Índice de Calidad de Agua, año 2011	43
Tabla 11. Valoración de Calidad de Agua para la Región Hidrográfica del Río Grande de Sonsonate, año 2011.	44
Tabla 12. Nombre y características de las centrales hidroeléctricas existentes en la cuenca del río Sensunapán o Grande de Sonsonate.	46
Tabla 13. Situación de las centrales existentes o en proyecto en el río Sensunapán, a efectos de sus respectivas autorizaciones ambientales.	47
Tabla 14. Caudales medios estimados (m ³ /s) en sitios de interés en la cuenca del río Sensunapán. ...	48
Tabla 15. . Instrumentos normativos para el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del río Sensunapán.	56
Tabla 16. Caracterización de la variabilidad interanual	58
Tabla 17. Aportaciones mensuales y caudales diarios mensuales en la estación de Acajutla, por tipo de año	59
Tabla 18. Caracterización de la serie de caudales registrados en la estación de Acajutla, a partir de su discretización en valores habituales, extremos-avenidas y extremos-sequías, para cada uno de los tipos de año definidos con anterioridad.	60
Tabla 19. Principales percentiles de excedencia de la estación de Acajutla.	61

Tabla 20. Ratios de área utilizados para la extrapolación de los caudales registrados en la estación de Acajutla a las secciones de estimación del caudal ecológico, en los sitios de presa de las centrales hidroeléctricas de la cuenca del río Sensunapán.	62
Tabla 21. Valores de los métodos de caudal mínimo continuo (m ³ /s).....	66
Tabla 22. Valores mensuales de caudales proporcionados por los métodos de caudal mínimo mensual.....	67
Tabla 23. Valor del caudal básico (Qb) tras la aplicación del método QBM y valores mensuales del caudal de mantenimiento (Qm) en la estación de Acajutla.	68
Tabla 24. Límites superior e inferior del RVA para los caudales mensuales (m ³ /s) en la estación de Acajutla.	69
Tabla 25. Mediana y límites superior e inferior del RVA para distintos máximos y mínimos anuales (m ³ /s) en la estación de Acajutla.	74
Tabla 26. Límites superior e inferior del RVA para la frecuencia y duración de periodos de caudal alto y bajo (Número de días).....	74
Tabla 27. Caudales ecológicos mínimos en las secciones de control, derivados de la aplicación del umbral inferior P33 en el método RVA	75
Tabla 28. Porcentaje de días de cumplimiento de los rangos inferiores propuestos en el régimen de caudales ecológicos (P25 y P33) por cada uno de los meses, y porcentaje de cumplimiento anual en la estación de Acajutla	76
Tabla 29. Método de Tennant ó de Montana (WWF, 2010).	77
Tabla 30. Descripción cualitativa de caudales generada por Tennant (1976).....	78
Tabla 31. Caudal ecológico utilizando 10%QMA, 20%QMA, 40%QMA,30%QMA Y 50%QMA construcción propia, 2017	78

Resumen.

En el presente trabajo se desarrolla una propuesta metodológica para determinar un caudal ecológico para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en El Salvador, de modo que permita mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición que son aprovechadas por este tipo de centrales, además se establecen criterios para dimensionar un caudal ecológico, ya que no existe una normativa como tal para el cálculo del mismo, todo con el objetivo de que se pueda utilizar en proyectos reales sobre generación de energía eléctrica.

Capítulo 1: Generalidades

1.1. Introducción.

La pretensión de que el caudal natural de un río debe reservarse íntegramente para el perfecto funcionamiento del ecosistema acuático resulta una utopía en la actualidad. El único planteamiento que parece realista para gestionar el agua superficial racionalmente es compaginar sus distintos usos, asegurando en todo momento un estado aceptable del ecosistema fluvial. Fomentar y garantizar la gestión integrada del caudal ambiental es necesario, como también el desarrollo y formulación de normas y políticas de manejo del agua, que restrinjan la alteración y el uso del recurso hídrico, en aras de lograr un equilibrio con el manejo del ecosistema (Parras, 2012).

El incremento desproporcionado en la demanda de agua para cubrir las crecientes necesidades humanas ha resultado en una problemática muy compleja entre el uso y la explotación de ríos, y su conservación como sistema ecológicamente estable e importante prestador de innumerables servicios ambientales. Técnicamente, implica un reto y enfrenta grandes dificultades desde el punto de vista social, económico y político, el manejo del agua se ha dirigido tradicionalmente a satisfacer las necesidades de consumo, riego, industria y generación de electricidad.

El agua es un bien escaso en ciertas áreas de El Salvador por estar secas o relativamente secas de forma natural, ya sea por existir en ellas una importante acción antrópica sobre el medio hídrico encaminada a satisfacer las diversas demandas, o una combinación de ambas situaciones. Así, el gran objetivo de la planificación hidrológica consiste en lograr la compatibilidad de los usos del agua con la preservación y en caso necesario, mejora del medio ambiente. Ello requiere de una planificación y gestión eficaces que aseguren el suministro al mayor número y tipo de usuarios posible evitando la excesiva afección (en cantidad y calidad) a los recursos hídricos presentes en el medio subterráneo, ríos, zonas húmedas y aguas de transición.

Con objeto de asegurar esta compatibilidad y en definitiva, el desarrollo sostenible, han de establecerse una serie de objetivos medioambientales cuyo cumplimiento asegure la disponibilidad de recursos en cantidad y calidad, así lo establece la ***Ley General de Aguas en El Salvador***, presentada a la Asamblea Legislativa el 22 de marzo de 2012, que establece la necesidad de determinar el caudal ecológico, a fin de mantener la estabilidad de los ecosistemas y satisfacer las necesidades, demandas sociales y económicas de la población. (MARN, 2013).

1.2. Definiciones e indicadores de calidad del agua.

Por definición el caudal ecológico es la cantidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para mantener el hábitat del río y su entorno en buenas condiciones, considerando las necesidades de las poblaciones humanas, animales y vegetales, así como los requerimientos físicos para mantener su

estabilidad y cumplir sus funciones tales como la de flujo de dilución, capacidad de conducción de sólidos, recarga de acuíferos, mantenimiento de las características estéticas y paisajísticas del medio y amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos. Después de los usos de agua para las diferentes actividades humanas hay que mantener un caudal para la naturaleza, que sirve para conservar la biodiversidad y las funciones ambientales. (Vélez & Ríos, 2004)

Por otro lado, también cabe destacar que la visión actual del concepto de caudal ecológico no se reduce únicamente a un único valor mínimo y constante de caudal, sino que requiere a su vez una modulación temporal del mismo, que permita cubrir las necesidades y requerimientos ambientales asociados al ámbito fluvial. Es por ello que junto al término caudal ecológico han venido apareciendo diversos conceptos asociados (Magdaleno, 2005), reconociéndose los siguientes entre los más importantes:

Caudal Ecológico Mínimo: Es el caudal que restringe el uso durante las estaciones de caudales bajos y mantienen la vida en el río. No aporta una solución ecológica. Se calcula de forma directa y arbitraria, producto de un pacto más que de una formulación científica. (King et al., 1999; Palau ,2003)

Caudal de Mantenimiento: Caudal requerido para mantener todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo la incorporación continua y balanceada de las especies acuáticas y riparias. Es un caudal calculado y dirigido hacia la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial (APROMA, 2000).

Caudal Ambiental: Es el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados. El caudal ambiental es usado para valorar cuánta agua puede quitársele al río sin causar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema ribereño en el caso de ríos gravemente alterados. Se considera caudal ambiental la cantidad de agua necesaria para restablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida. (King & Louw, 1998; Palau, 1994; Dyson et al., 2003)

Caudal de Acondicionamiento: Se refiere a un caudal que puede establecerse como complemento de caudales mínimos o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos, etc.). (Palau 2003)

Caudal de Compensación: Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido. (UNESCO, 2014)

Régimen de Caudal Ambiental: Es aquel que permite cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. En él se detallan caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración, tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e

interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema. (Hirji & Davis, 2009)

Régimen de caudal ecológico: La estimación de caudales ecológicos debe formularse para asegurar la integridad del ecosistema fluvial, tomando conciencia de los usos de los recursos hídricos, de las necesidades que se satisfacen, y convertirse así en un instrumento para la reflexión, para la conciliación, para la toma de decisiones: la estimación de caudales ecológicos debe concebirse para ser integrada en un proceso que promueva el desarrollo coordinado y la gestión del agua, tierra y recursos relacionados, y que permita maximizar el resultado económico y social de una manera equitativa y sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema. (King et al., 1999)

Caudales ambientales: Los caudales ambientales son los flujos de agua, el momento de aplicación y la calidad del agua precisos para mantener los ecosistemas de agua dulce y de estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen de tales ecosistemas. (Declaración de Brisbane, 2007)

1.2.1. Indicadores de calidad del agua.

Son parámetros físicos y químicos, que se pueden medir y comparar a fin de determinar el uso de un flujo de agua en un río, los más importantes son:

- Demanda bioquímica de oxígeno
- Oxígenos disueltos
- Sólidos suspendidos totales
- Índice de iones de hidrógeno (pH)
- Mercurio
- Plomo
- Grasa y aceites.

1.3. ¿Por qué es necesario un caudal ecológico?

Es cada vez más evidente que la biodiversidad de los ecosistemas dulceacuícolas, a escala regional y mundial, está en mayor peligro que la de los sistemas terrestres o marinos. Los sistemas de agua dulce albergan –en menos de 0.01% del total mundial de las aguas superficiales– 40% de las especies de peces. Y si a este total se agregan los anfibios, los reptiles y los mamíferos asociados al agua, la cifra crece hasta un tercio de la diversidad biológica mundial de vertebrados. (Martínez Valdés, Y, 2017)

Una estimación conservadora calcula en 55% el descenso promedio de la población mundial de vertebrados de agua dulce entre 1970 y 2000. Al mismo tiempo, la comunidad necesita el agua de los ríos, los lagos y los humedales para muchas cosas: para beber, para la producción de alimentos, para la industria; para re-purificarla, y para la pesca, la navegación, la recreación y las actividades culturales.

Si se es cuidadoso, se puede obtener todo esto de los ríos, pero es cada vez más común que las personas vean a los ríos solamente como proveedores de agua y como drenajes.

De aquí que muchos de los ríos del mundo entero hayan perdido su caudal y muchos otros no lleven ya sino aguas residuales. Al igual que otros recursos naturales, los ríos son muy útiles si se usan razonablemente, e inútiles –e incluso peligrosos – si se explotan en exceso.

Los ríos de poco o ningún flujo, o con grandes cantidades de aguas residuales, tienden a convertirse en focos de enfermedades como la malaria, el cólera, la esquistosomiasis y la disentería. El propósito de los caudales ecológicos es conservar al menos algunos de los patrones naturales de los flujos a todo lo largo de un río, de modo que las personas, los animales y las plantas corriente abajo puedan subsistir y continuar utilizando sus recursos. Por consiguiente, su propósito es, en realidad, lograr el uso razonable de los recursos hídricos.

Para determinar el destino de un caudal ecológico, la gente debe decidir lo que espera del río. ¿Quiere cultivar la tierra, generar electricidad, abastecer a la población o conservarlo en un parque nacional? Debe optar, en segundo lugar, por las condiciones en que espera que esté el río. En la mayoría de los casos la comunidad quiere aprovechar sus aguas y demás recursos, por lo que no pretende conservarlo en condiciones enteramente naturales. También en la mayoría de los casos (con suerte en todos) no quiere convertirlo en un cauce seco o en desagüe residual.

De modo que debe determinar en qué punto entre el estado natural y el estado de pérdida total le gustaría conservarlo. Éste es el papel de la evaluación de los caudales ecológicos (Jay O’Keeffe, Tom Le Quesne, 2009)

1.4. Caudales ecológicos y los aprovechamientos hídricos.

Los caudales en los ríos de todo el mundo se modifican a través de la construcción de presas, embalses y sustracciones para el suministro agrícola y urbano; para mantener los flujos apropiados para la navegación y por la construcción de estructuras de control. Estas intervenciones han generado impactos significativos reduciendo, en general, los caudales totales de muchos ríos, afectando sus estacionalidad, magnitud y periodicidad (Ravent et al, 2000; Fischer y Kummer, 2000; TNC, 2006).

La alteración en la calidad del agua no solo se observa en la salud de los ecosistemas acuáticos y sus componentes, sino que se refleja directamente en las actividades económicas que dependen de este ecosistema, como son la pesca en los ríos y estuarios, navegación, llanuras de inundación y su vegetación natural, mantenimiento de acuíferos y presencia de humedales, estos últimos importantes como retenedores de suelo y contaminantes.

1.5. Cómo se hace en la actualidad el dimensionamiento de un caudal ecológico para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH).

Como las centrales hidroeléctricas utilizan el agua de los ríos, la condición de utilización del río debe ser investigada para la planificación de proyectos. El uso del río incluye la generación hidroeléctrica, agua potable, irrigación y suministro de agua industrial, pesca y actividades de transporte interno.

La construcción de la obra de toma es acompañada de alguna inundación de hogares y tierras agrícolas y la construcción de instalaciones generadoras reduce el caudal del río entre los sitios de toma y el canal de descarga. Por lo tanto, la condición de uso de la tierra en el área de inundación y las instalaciones de uso del agua en el área del proyecto deben ser estudiados con los mapas topográficos disponibles. (CNE, 2012)

Si hay uso del agua entre el sitio propuesto de la toma para la casa de máquinas, debe liberarse el agua río abajo de la toma para la descarga requerida de uso del agua.

Si la longitud del canal de agua propuesto para la hidroeléctrica es considerable, el caudal de mantenimiento del río (caudal ecológico) debe ser considerado.

Una referencia del caudal mínimo requerido de mantenimiento del río para la ecología del río es mostrada a continuación:

- ❖ 10% de la descarga anual promedio a lo largo del año (Usualmente este porcentaje es el usado en los proyectos desarrollados en El Salvador). Lineamiento de la Ley Francesa de aguas calculado para un periodo mínimo de 5 años (Diez,2000)
- ❖ 10% de la descarga diaria (Guía para el desarrollo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas En El Salvador). (Plan Maestro CNE,2012)
- ❖ $0.1\sim 0.3 \text{ m}^3/\text{s}/100\text{km}^2$ (Lineamiento Japonés para Energía Hidroeléctrica, JICA).
- ❖ Descarga mínima a lo largo del año.
- ❖ Descarga necesaria para peces, fauna, terreno y ecología del río.



Figura 1. Caudal ecológico PCH Sensunapán. (Fuente: <http://www.laprensagrafica.com/sensunapan--una-minihidro-en-operación>).

1.6. Marco legislativo actual en El Salvador en lo relativo a la gestión de agua y medio ambiente.

Por lo que respecta al marco legislativo actual para la determinación y establecimiento de caudales ecológicos en El Salvador, a continuación se mencionan las diferentes leyes y normas relacionadas con la gestión del agua y el medio ambiente en el país. Como se puede observar son pocas las referencias que existen de una forma indirecta.

Ley del Medio Ambiente (1998): En su artículo 70 se establece que “El Ministerio elaborará y propondrá al Presidente de la República para su aprobación los reglamentos necesarios para la gestión, uso, protección y manejo de las aguas y ecosistemas, tomando en cuenta la legislación vigente y los criterios siguientes:

- a) Su manejo se realizará en condiciones que prioricen el consumo humano, guardando un equilibrio con los demás recursos naturales.
- b) Los ecosistemas acuáticos deben ser manejados tomando en cuenta las interrelaciones de sus elementos y el equilibrio con otros.

- c) Se promoverán acciones para asegurar que el equilibrio del ciclo hidrológico no sufra alteraciones negativas para la productividad, el equilibrio de los ecosistemas, la conservación del medio ambiente, la calidad de vida y para mantener el régimen climático.
- d) Asegurar la cantidad y calidad del agua, mediante un sistema que regule sus diferentes usos.
- e) Se establecerán las medidas para la protección del recurso hídrico de los efectos de la contaminación.
- f) Todo concesionario de un recurso hídrico para su explotación será responsable de su preservación.

Reglamento General de la Ley del Medio Ambiente (2000): En su Artículo 69 se establece que el uso del agua de las cuencas hidrográficas y mantos acuíferos debe basarse en la calidad y la disponibilidad del recurso, así como en enfoques de su uso sostenible, tomando en consideración los siguientes criterios:

- a) Los usos de las aguas lluvias, superficiales, subterráneas y costeras de la cuenca, deben planificarse sobre la base de evaluaciones de la cantidad y calidad del agua.
- b) El agua utilizada para el consumo humano, con fines energéticos, domésticos, industriales, turísticos, pecuarios, agrícolas, pesqueros y de acuicultura, no debe exceder los límites necesarios para el mantenimiento de los ecosistemas de la cuenca.
- c) El agua utilizada para el mantenimiento de los ecosistemas de humedales no debe exceder los límites necesarios para el funcionamiento de éstos.
- d) La calidad y cantidad del agua para los diferentes usos, incluido el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, deberá estar sujeta a las prácticas correctas de uso y de disposición del recurso hídrico.
- e) Con el propósito de mantener el nivel freático de cualquier acuífero, la tasa de bombeo permitido deberá ser calculada con base en la tasa de recarga natural del agua subterránea.
- f) Se deberá promover la formulación y la implementación de políticas e incentivos que propicien la utilización sostenible del agua y del suelo que la contiene. Por su parte, el artículo 97 indica que “Para el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos nacionales, constituidos por aguas superficiales y subterráneas, corrientes o detenidas, incluyendo sus cauces, se deberá obtener el Permiso Ambiental correspondiente de conformidad a los Arts. 62 y 63 de la Ley”.

Ley de Riego y Avenamiento (1970): El art. 11 señala que “Las concesiones se otorgarán por Acuerdo del Poder Ejecutivo en el Ramo de Agricultura y Ganadería, para un plazo no mayor de cincuenta años”. El estado responderá de los perjuicios que le sobrevengan al concesionario por la falta o disminución del caudal expresado en la concesión, excepto cuando dicha falta o disminución se deba a causas naturales o a acción de terceros. Las concesiones podrán ser renovadas por períodos iguales sucesivos”.

Hasta este momento, la legislación relacionada con los recursos hídricos estaba compuesta por un grupo de normas sobre regulación, conservación y uso sectorial, lo que dificultaba su gestión y administración sostenible.

Consciente de esta situación, se propuso el Anteproyecto de la *Ley General de Aguas* (MARN, 2012a) para su aprobación en marzo 2012. La falta de consenso entre los partidos políticos ha obstaculizado este proceso.

En este anteproyecto de Ley, en su Art. 126, se indica que el MARN será el responsable de determinar el caudal ambiental, a fin de mantener la estabilidad de los ecosistemas y satisfacer las necesidades y demandas sociales y económicas de la población. Para su determinación, el MARN podrá coordinar con otras entidades que estén relacionadas con la temática de los recursos hídricos.

Según el Art. 9 de este mismo anteproyecto de Ley, se entenderá como caudal ambiental al régimen hídrico necesario y permanente, característico y propio de cada cuenca, que se da en un río, humedal o zona costera, que permite todo aprovechamiento, con la condición que se mantenga la estabilidad de los ecosistemas y satisfaga las necesidades de usos particulares y comunes.

Otros aspectos referentes a los caudales ambientales que quedan recogidos en el anteproyecto de ley son:

Caudal ambiental y ecosistemas. Art. 52: Para toda autorización deberá tomarse en cuenta los caudales ambientales mínimos y las condiciones de calidad de las aguas para mantener el equilibrio de los ecosistemas de cuencas, subcuencas, microcuencas, así como de esteros, manglares o acuíferos específicos.

Trasvases. Art. 57: De manera excepcional, el MARN podrá disponer o autorizar, de forma escrita y motivada, los trasvases de aguas superficiales o subterráneas de una cuenca a otra, cuando dentro de la cuenca demandante no exista alternativa que garantice los caudales mínimos.

Protección y conservación de los recursos hídricos. Art. 117.- El MARN deberá desarrollar, por sí o a través de terceros, acciones que tiendan a proteger, mejorar o mantener las condiciones de disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en cantidad y en calidad, en términos de la presente Ley.

Los Planes Hídricos incorporarán en sus actuaciones de regulación y control, las directrices y actividades que tengan por finalidad la protección y conservación de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas, ecosistemas y caudales ambientales.

Directrices para el aprovechamiento y conservación de los recursos hídricos. Art. 118: El MARN formulará las directrices y realizará las actividades y acciones necesarias orientadas a proteger los recursos hídricos en términos del uso o aprovechamiento de dichos recursos; para tal efecto, considerará las limitaciones siguientes: Captaciones de agua no mayores a la disponibilidad del recurso superficial de la zona de recarga, conservando los caudales ambientales y las demandas autorizadas en las zonas aguas abajo.

Reservas Naturales. Art. 131.- El Plan Nacional Hídrico identificará los cuerpos de agua que constituyan reservas naturales estratégicas, estableciendo mecanismos y regulaciones que aseguren los caudales vitales y su calidad.

La determinación de regímenes de caudales ecológicos requiere de información diversa.

La disponibilidad y especificidad de esta información, en cuanto a los intervalos de tiempo a los cuales corresponda, condiciona el tipo de metodología aplicable al cuerpo de agua para el que se determinarán los regímenes de caudales ecológicos.

En El Salvador, tal como en el resto de países de la región, mucha de esta información es escasa, los registros hidrométricos suelen ser antiguos, discontinuos y correspondientes a un régimen alterado; el monitoreo de la calidad del agua suele estar compuesta por muestreos puntuales condicionados a situaciones específicas y los levantamientos topográficos junto con los estudios de biodiversidad y curvas de idoneidad suelen ser muy escasos, puntuales o inexistentes.

Esto ha conducido a la aplicación de metodologías de caudal ecológico obsoletas y poco flexibles, asignando un porcentaje del caudal medio anual alterado, eliminando toda la estacionalidad del río, sin considerar los requerimientos específicos de las especies acuáticas. Esto a su vez ha degradado los ecosistemas fluviales, generando ríos de escaso valor ecológico.

Es por esto que la implantación de regímenes de caudales ecológicos y el cumplimiento de los objetivos de los mismos tomará algún tiempo en lograrse, y requerirá un proceso paulatino, a través de varios ciclos de revisión, en los que se incorporará cada vez más información que complemente el conocimiento hidrobiológico de las cuencas del país y los usos, demandas y presiones a los que cada una de ellas se encuentra sometida. (MARN, 2013)

Capítulo 2. Metodología a nivel mundial para cálculo del caudal ecológico.

Los métodos existentes para la determinación de caudales mínimos o ecológicos son múltiples y variados, pero pueden dividirse en dos grandes grupos: Métodos matemáticos y métodos hidrobiológicos. Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos, adaptación del método Ifim-phabsim y aplicación a los ríos españoles, (Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos adaptación del método ifim-phabsim y aplicación a los ríos españoles. Martin Mayo. 2000)

2.1. Métodos matemáticos.

Los métodos matemáticos son los que se basan en el análisis de los caudales naturales del río regulado, en base a series de datos más o menos largas plasmados en fórmulas empíricas generalizables de rápida y fácil aplicación, sin realizar estudios de campo; o bien, aquellos otros cuyos resultados son obtenidos por el cálculo de determinados porcentajes fijos del caudal medio interanual o módulo.

Dentro de este grupo y sin ser exhaustivos se tiene:

- Un porcentaje del módulo, generalmente el 10%.
- Fórmula de Matthey o método matemático suizo.
- Método suizo.
- Método de Montana y otros similares.
- Análisis de la frecuencia de caudales.
- Método Asturiano.
- Método Navarro.
- Otros métodos basados en el estudio de series de caudales.

2.2. Métodos hidrobiológicos.

Los métodos hidrobiológicos son aquellos que se basan en la obtención de datos de campo de cada río en particular considerando tanto los parámetros hidráulicos como los bióticos. Entre estos métodos destacan los siguientes:

- Análisis de hábitat y análisis de transectos.
- Método del perímetro mojado.
- Análisis incremental.
- Método de microhábitats.
- Método de conservación de los hábitats de Nehring.
- Método de Fleckinger.
- Método de Dávila.
- Método IFM-PHABSIM.

2.3. Conceptualización general de cada uno de los métodos para determinar el caudal ecológico.

2.3.1 Porcentajes fijos.

El más sencillo de los métodos matemáticos consiste en determinar el caudal mínimo, como un porcentaje fijo del caudal medio interanual, o módulo obtenido de una serie suficientemente significativa de datos de aforos para una sección ubicada en el emplazamiento de la presa, o lugar de detracción de caudales.

Como referencia se considera la Ley de Aguas Francesa que determina un caudal mínimo igual al 10% del módulo, evaluado con datos de un periodo mínimo de 5 años. Para módulos superiores a 80 m³/s, mediante decreto del Consejo de Estado, podrá rebajarse el caudal mínimo a un máximo del 5% del módulo. Sin embargo, también se consideran algunos aspectos bióticos, añadiendo otras condiciones, tales como que el caudal mínimo debe ser suficiente para garantizar la conservación de la vida, el movimiento y la reproducción de las especies que pueblan las aguas en el momento de instalación de la obra.

2.3.2. Fórmulas de Matthey.

Las fórmulas de Matthey elaboró una fórmula, que permite calcular el caudal mínimo a partir de aquel caudal que circula al menos durante trescientos días al año (Q300: caudal superado en 300 días del año, obtenido a partir de la curva de caudales clasificados). A partir de estos caudales se derivan las siguientes fórmulas:

$$Q_{\text{mínimo}} = (15 \times Q_{300}) / (\text{Ln } Q_{300})^2 \quad (1)$$

$$Q_{\text{mínimo}} = 0.25 \times Q_{300} + 75 \quad (2)$$

$$Q_{\text{mínimo}} = 0.20 \times Q_{300} \quad (3)$$

Los caudales resultantes de la aplicación de estas fórmulas resultan ser muy altos y conservadores, pues al utilizar Q300 se dejan fuera los caudales más bajos correspondientes a parte de la época de estiaje. Al utilizar Q347 se obtienen valores de caudal muy bajos, ya que hay que tener en cuenta que caudales inferiores al Q347 sólo se producen 18 días al año, obteniendo así valores de caudal muy bajos.

Actualmente son utilizadas en Suiza, Francia y en algunas comunidades españolas (Cantabria y Aragón).

2.3.3 Método suizo.

La legislación suiza se basa en un método que utiliza fórmulas empíricas para la cuantificación del caudal mínimo, pero con unas premisas de carácter cualitativo:

- El caudal mínimo debe permitir el mantenimiento de la calidad de las aguas superficiales, contando con los vertidos de aguas utilizadas y los existentes en los planes futuros.
- Se deben mantener los niveles de los acuíferos subterráneos, de manera que no se vean perjudicados ni la vegetación ni los usos de agua potable actuales y previstos en el futuro.
- Se deben conservar los biotopos y biocenosis raras y los lugares de esparcimiento particularmente bellos, cuyo aspecto y estética ambiental dependan de la cantidad de agua circulante. Para no entorpecer el movimiento de los peces migratorios y si el caudal es superior a 50 l/s, es obligatorio mantener una profundidad de al menos 20 cm en el cauce.

Para el establecimiento del caudal mínimo se hace una distinción entre aguas piscícolas y no piscícolas (o bien aguas sin interés piscícola aunque tengan peces, por las escasas dimensiones de los cauces).

Así tendríamos:

Aguas no piscícolas: un mínimo de 50 l/s o el 35% del caudal que es superado 347 días al año (Q347) siempre que sea menor o igual a 1 m³/s.

Aguas piscícolas: Se hacen distinciones en función de Q347.

- ✓ Para Q347 > 60 l/s el caudal mínimo sería 50 l/s, añadiéndose 8 l/s por cada 10 l/s adicionales.
- ✓ Para Q347 > 160 l/s el caudal mínimo sería 130 l/s, añadiéndose 4.4 l/s por cada 10 l/s adicionales.
- ✓ Para Q347 > 560 l/s el caudal mínimo sería 280 l/s, añadiéndose 31 l/s por cada 100 l/s adicionales.
- ✓ Para Q347 > 2,500 l/s el caudal mínimo sería 900 l/s, añadiéndose 21.3 l/s por cada 100 l/s adicionales.
- ✓ Para Q347 > 10,000 l/s el caudal mínimo sería 2,500 l/s, añadiéndose 150 l/s por cada 1,000 l/s adicionales.
- ✓ Para Q347 > 60,000 l/s el caudal mínimo sería de 10,000 l/s.

Para calcular el valor de Q347 se propone la siguiente ecuación:

$$Q347 = (a_o \times Q_{an}) / 10 \quad (4)$$

Siendo Q_{an} el caudal medio anual y a_o un coeficiente que toma los valores de 0.5; 1; 1.5 y 1.8. Para los casos de turbinación a pie de presa, los caudales mínimos obtenidos son suficientes para dimensionar un dispositivo de franqueo eficaz, pero claramente insuficientes para mantener un tramo de río en condiciones habitables.

2.3.4. Método de Tennant o método de Montana. Método de Tessman y otros similares.

Este método, desarrollado y puesto a punto por hidrobiólogos del estado de Montana partiendo de datos de once ríos (Elser, 1972; Tennant, 1974, 1976) con poblaciones de salmónidos y de ciprínidos, se basa en la hipótesis de que "las condiciones de hábitat para la vida piscícola son cualitativamente muy parecidas en una corriente de agua o en otra para un mismo porcentaje del caudal medio anual.

Para su aplicación se estudian tres variables, consideradas fundamentales en la capacidad de acogida del medio para las especies piscícolas; éstas son: el porcentaje de perímetro mojado con respecto a la anchura del lecho, la profundidad y la velocidad media.

La evolución de los valores de estas tres variables en función del caudal, expresado en porcentaje del caudal medio anual, según los autores, justifica los intervalos elegidos. El 10% del caudal medio es un mínimo a respetar imperativamente, para evitar una fuerte degradación del medio. El caudal se obtiene utilizando los criterios expuestos en la Tabla 1.

Tabla 1.- Caudales mínimos según el método de Tennant (1976). (WWF. 2010)

Caudal mínimo		Calificación	Efectos
% del caudal mínimo			
Oct - Mar	Abr - Sept		
10%	10%	Muy insuficiente	Severa degradación de la mayor parte de los elementos del entorno.
10%	20%	Débil	Mínimo. Permite salvaguardar algunos hábitats para la vida acuática.
10%	30%	Aceptable	Caudal recomendado para mantener los hábitats y la vida.
20%	40%	Bueno	-
30%	50%	Excelente	-
40%	60%	Excepcional	Para los primeros periodos de crecimiento de la mayor parte de las formas de vida.
60%	100%	Optimo	-
200%	-	Limpieza	Limpieza del sustrato para evitar el estancamiento.

En la actualidad, el método de Montana se aplica de una forma más sencilla (Bozeman, 1976), considerando sólo tres caudales obtenidos del módulo interanual (Qm), a saber:

- ✓ Caudal mínimo: $0.1 \cdot Q_{an}$, considerado como un mínimo absoluto.
- ✓ Caudal bueno: $0.3 \cdot Q_{an}$, considerado como el caudal que proporciona hábitat suficiente para la mayoría de las especies acuáticas presentes en el tramo.
- ✓ Caudal excelente: $0.6 \cdot Q_a$, considerado como el caudal que proporciona hábitat suficiente y satisface además otros usos recreativos del cauce.

El método de Tessman es una modificación del método de Montana (Bozeman, 1976), y así es conocido (Método de Tennant modificado).

Determina los caudales mínimos comparando un porcentaje determinado del caudal medio interanual (Q_{an}) con el caudal medio mensual (Q_{mes}), Pueden utilizarse caudales diarios o mensuales, en este último caso los valores finales obtenidos son algo más altos. Presenta una mejora con respecto al método de Tennant, al calcular caudales mínimos para cada mes del año. El caudal mínimo del mes es aquel que satisface alguna de las siguientes condiciones:

- ✓ Si $0.4 \cdot Q_{an} > Q_{mes}$ el caudal mínimo recomendado es Q_{mes} .
- ✓ Si $0.4 \cdot Q_{an} < 0.4 \cdot Q_{mes}$ el caudal mínimo recomendado es $0.4 \cdot Q_{mes}$.
- ✓ De no cumplirse ninguna de las desigualdades anteriores el caudal mínimo recomendado es $0.4 \cdot Q_{an}$.

2.3.5. El método de Arkansas (1987).

Deriva del método de Tennant, divide el año en tres épocas diferentes:

- ✓ Época de aguas bajas: que comprende los meses de julio a octubre.
- ✓ Época de aguas altas: comprendiendo los meses de noviembre a marzo.
- ✓ Época de desove: meses de abril a junio, según el lugar de aplicación y las especies existentes.

La determinación de caudales mínimos se basa en los caudales medios mensuales, de tal forma que, para la época de aguas bajas el caudal mínimo será el 50% del caudal medio mensual; para la época de aguas altas será el 60% y para la época de freza el 70%. De esta forma se determina un régimen de caudales con carácter mensual.

2.3.6. El método de Texas (Trans-Texas Method, 1974).

Desarrollado por el Servicio de Vida Salvaje y Parques de Texas, es una modificación del método de Arkansas para adecuarlo a las condiciones climatológicas de ese estado. Divide el año en sólo dos épocas:

- ✓ Época húmeda: comprende los meses de noviembre a febrero; el caudal mínimo es el 40% del caudal medio mensual.

- ✓ Época seca: desde marzo hasta octubre; el caudal mínimo es el 60% del caudal medio mensual.

Como puede verse, la adecuación de estos métodos es sencilla al lugar de aplicación, considerando su particular climatología. Los porcentajes aplicados para la obtención de caudales mínimos son similares en cada caso, y es de destacar que, al menos, se obtiene un régimen con carácter mensual.

2.3.7. Análisis de la frecuencia de caudales (Flow Duration Curves).

El método básico consiste en el análisis de frecuencia de caudales en cada mes del año, utilizando datos diarios. Se recomienda aquel caudal superado al menos el 80% del tiempo. El caudal es diferente para cada uno de los meses del año, determinándose en realidad un régimen de caudales, lo que ya supone una mejora considerable con respecto al mantenimiento de un caudal fijo en toda época.

El método de Utah utiliza los mínimos mensuales históricos, determinando un régimen de caudales con carácter mensual, en el que el caudal mínimo de cada mes es el mínimo registrado en una serie suficientemente larga de años.

El método utilizado por el "Programa de Recursos de las Grandes Llanuras del Norte"(1974), utiliza registros históricos de caudales medios mensuales y define tres grupos, en función de ciertas probabilidades de excedencia: caudales bajos, caudales normales y caudales altos. El grupo de caudales normales es el que está comprendido entre los percentiles 15 y 85, obtenidos los caudales mensuales "normales", se realiza un nuevo análisis de frecuencias de caudales diarios correspondientes a estos meses, el caudal mínimo es el que corresponde al percentil 10 de esta nueva curva de caudales clasificados.

2.3.8. El método de Hoppe.

El método de Hoppe es similar al anterior, utilizando los siguientes criterios para la selección del caudal mínimo:

- ✓ Producción de alimento y cobertura: caudal diario que es excedido el 80% del tiempo.
- ✓ Desove: caudal diario que es excedido el 40% del tiempo.
- ✓ Flujo de avenida: caudal diario que es excedido el 17% del tiempo, mantenido durante 48 horas.

2.3.9. El método RVA (Range of Variability Approach, Richter et al, 1997).

Es otro método basado en el análisis de series de caudales (caudales diarios), utilizando un número suficiente de observaciones (más de 20 años), de tal forma, que se pueda considerar que los datos utilizados no están sesgados por actuaciones humanas posteriores.

Se ha desarrollado, suponiendo que el objetivo fundamental, es la conservación de la biodiversidad acuática en condiciones naturales y la protección del ecosistema como fin prioritario.

Utiliza 32 parámetros, obtenidos a partir de las series históricas de caudales diarios, entre los que cabe destacar: el caudal medio mensual, el caudal mínimo anual que se produce 1, 3, 7, 30 y 90 días, el máximo y el mínimo diario del mes de julio; la duración de las crecidas y su número; la duración de las sequías y su número.

Todos estos valores tienen significación hidrológica e influencia de la biota, siempre que existan para el lugar en cuestión. El método se aplica en seis pasos:

- ✓ Paso 1: se determina el régimen natural y sus variaciones, identificando los datos no alterados de la serie de datos disponible. Para cada uno de los 32 parámetros considerados, se determina su valor medio y sus desviaciones.
- ✓ Paso 2: los caudales a aplicar deben estar comprendidos en el rango natural de caudales, comprobando cada uno de los 32 parámetros que quedan acotados entre un valor máximo y un valor mínimo (por ejemplo $\pm 1 * SD$, siendo SD la desviación estándar), a determinar en cada caso.
- ✓ Paso 3: en base a los parámetros determinados y sus límites admisibles, se diseña una estrategia de gestión de los caudales según los fines perseguidos.
- ✓ Paso 4: determinada la estrategia de gestión, se procede a su aplicación y seguimiento, estudiando los efectos que se producen sobre el ecosistema bajo las nuevas condiciones hidráulicas.
- ✓ Paso 5: al final de cada año, se caracteriza el nuevo sistema hidrológico mediante el análisis de las treinta y dos variables iniciales, comprobando que permanecen en los rangos determinados.
- ✓ Paso 6: se repiten los pasos 2 a 5 para ir reajustando el modelo original.

Es un modelo rápido, y que no depende de la existencia de información ecológica de la zona, En el caso de no existir suficientes datos hidrológicos y de carecer de información ecológica sobre el cauce, el método es de difícil aplicación.

2.3.10 Método Asturiano.

La normativa asturiana establece tres niveles de protección de los cauces, basando el cálculo del caudal mínimo en el método suizo. El caudal mínimo se calcula a partir del Q347, obtenido mediante la fórmula aceptada por la legislación suiza antes mencionada.

Para el nivel de protección base I, el caudal mínimo será el mayor de los valores obtenidos de las siguientes fórmulas:

$$Q_{\text{mínimo}} = 50 \text{ l/s} \quad (5)$$

$$Q_{\text{mínimo}} = 0.35 * Q347 \quad (6)$$

$$Q_{\text{mínimo}} = (15 * Q347) / (\text{Ln} * nQ347)^2 \quad (7)$$

$$Q_{\text{mínimo}} = 0.25 * Q347 + 75 \text{ l/s} \quad (8)$$

Los valores han de introducirse en litros por segundo; los resultados obtenidos por aplicación de las fórmulas 7 y 8 son incongruentes si se introducen los valores de caudal en metros cúbicos por segundo.

Para el nivel de protección medio II el caudal correspondiente al nivel de base I se incrementará en 2 l/s/km^2 de cuenca aprovechada.

En el nivel de protección máximo III el caudal correspondiente al nivel de base I se incrementa en 4 l/s/km^2 de cuenca aprovechada.

Además, en aquellos ríos del Principado, considerados de especial interés por su comprobada riqueza piscícola (especies migratorias, sobre todo salmón), la normativa advierte que el caudal debe ser aumentado en la cantidad que garantice la vida de la fauna piscícola, pero sin especificar cuál debe ser esa cantidad.

Para valores de Q_{347} superiores a 7501 l/s la fórmula (6) proporciona valores más altos que la fórmula (8), con lo que en realidad el método se reduce a la aplicación de dos de las cuatro fórmulas: la número (8) si Q_{347} es menor de 7501 l/s ; la número (6) si Q_{347} es mayor de 7501 l/s .

Este método es utilizado también por la Confederación Hidrográfica del Norte de España (CHNE).

2.3.11. Método Navarro.

En la metodología, o más bien, normativa Navarra se obtiene el caudal mínimo, inspirándose tanto en la ley suiza como en la francesa. Se hace una distinción en función de que las poblaciones piscícolas sean de salmónidos o de ciprínidos.

Así para las zonas de salmónidos se fija como caudal mínimo el Q_{330} , aquel sobrepasado 330 días al año, añadiendo además, que no contarán con informe favorable aquellas concesiones que sean superiores al Q_{80} (caudal bastante elevado ya que se produce menos de tres meses al año).

Para las aguas ciprinícolas, el decreto navarro establece el 10% del caudal medio interanual, fijo para todo el año; cuando el módulo supere los $50 \text{ m}^3 / \text{s}$ se rebaja a un 5% durante los meses de junio a octubre.

2.3.12. Método Vasco.

El método se basa en el mantenimiento de la diversidad ecológica. Se desarrolló en los ríos del País Vasco (Decampo & García de Bikuña, 1995).

La diversidad se mide por el número de taxones de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, pero a pesar de esta componente biológica, básicamente es un método matemático.

En efecto, el método se basa en el análisis de las series de datos foronómicos, de datos pluviométricos y de calidad de las aguas, considerando la contaminación química e identificando las posibles agresiones al medio fluvial. En la aplicación del método se obtienen las relaciones existentes entre

superficie de cuenca vertiente, caudal y otros parámetros hidráulicos con el número de taxones de macroinvertebrados existentes en el tramo considerado.

El caudal ecológico "aconsejable" determinado por este método es un caudal de base que debe mantenerse todo el año y que no debe disminuir salvo casos excepcionales (por ejemplo, sequía prolongada). Para la fijación de este caudal aconsejable se utilizan los siguientes criterios:

- 1) Debe generar un perímetro mojado, capaz de permitir la habitabilidad de 23 taxones de invertebrados.
- 2) En todas las estaciones generará un calado mínimo fijado según las condiciones particulares de cada estación.
- 3) La velocidad de la corriente será inferior en todas las estaciones a 60 cm/s, ya que, a partir de este valor, se produce el arrastre de un gran número de especies biológicas y se inhibe el desarrollo somático de las que resisten el arrastre.
- 4) El caudal aconsejable generará un valor del índice de Calidad del Hábitat (ICH) respecto a la profundidad y velocidad adecuado, tanto para los peces como para los invertebrados. Este índice de calidad de hábitat no es más que una función de preferencia de la especie con respecto a los parámetros hidráulicos considerados, evaluado como una frecuencia de ocurrencia entre 0 y 100%.

Los caudales se calculan en función del orden fluvial del cauce, según la clasificación de Strahler (Strahler & Strahler, 1997) y de la media geométrica de los caudales registrados en las distintas estaciones de aforos durante un periodo mínimo de tres años hidrológicos.

El valor más bajo que puede alcanzar el caudal aconsejable, se denomina caudal ecológico mínimo; oscila entre un 46% para los cauces de orden 1 y un 30% en los cauces de orden 5 a 6. Los caudales se calculan para cada mes.

2.3.13. Método del caudal base.

Este método ha sido desarrollado por Palau & Alcázar (1996) en la Universidad de Lérida. Partiendo de la base de que todos los componentes del hábitat fluvial (composición del sustrato, velocidad, profundidad, calidad del agua, disponibilidad de alimento, vegetación de rivera, etc.) dependen del régimen de caudales se podrán establecer una serie de relaciones, en las que se consideran como variables dependientes de una exclusiva variable independiente: el caudal. Bajo esta hipótesis resultaría que, el caudal y sus variaciones determinarían los factores físicos y bióticos del hábitat fluvial.

El método determina un caudal base, que se propone como "caudal mínimo medioambiental", definido como aquel caudal que, mantiene un nivel dado de funcionalidad biológica y garantiza una continuidad de las comunidades naturales sin la intervención del hombre.

El caudal base se obtiene por aplicación del método de medias móviles a los caudales medios diarios de una serie correspondiente a los últimos diez años.

Los datos se obtienen de las estaciones de aforo existentes en la cuenca; por lo que se puede considerar como un método meramente matemático, que analiza las series temporales de datos foronómicos.

Según los autores, el caudal base es específico para cada río, siendo los valores que se obtienen similares a los obtenidos por otros métodos. El método es de fácil aplicación y económico, objetivo y no arbitrario, ya que se basa en datos de caudales reales.

Los únicos datos necesarios son los caudales medios diarios, que pueden obtenerse fácilmente de las estaciones de aforo existentes; sin embargo, aquí reside su mayor limitación, ya que no podría aplicarse a tramos o ríos en los que no existan datos foronómicos o los existentes sean insuficientes.

2.3.14. Análisis del hábitat y análisis por transectos.

Se incluyen aquí los métodos precursores o los primeros intentos de correlacionar el hábitat con el caudal. Posteriormente han ido evolucionando hasta las técnicas actuales más complejas. El análisis del hábitat consiste en la evaluación de unos parámetros considerados básicos en la medición del hábitat fluvial (Keeley & Nickelson, 1978); así se tienen en cuenta la velocidad del agua, la profundidad de la lámina de agua, la granulometría del sustrato, la relación entre pozas y rápidos, etc., pudiendo considerarse un método semicuantitativo.

Para sistematizar la toma de datos, el segundo método introdujo la medición de los parámetros hidrológicos y bióticos en secciones transversales del cauce o transectos planos. Estas mediciones se realizaban en distintos tramos de río homogéneos y con distintos caudales, correspondientes a distintas épocas del año.

Se busca con ello una caracterización y evaluación de la habitabilidad del tramo estudiado, en función de la cantidad de agua que circula por él, el avance con respecto a los métodos numéricos es evidente. Sin duda, la habitabilidad, incluso si sólo la entendemos como espacio físico para su ocupación por las poblaciones acuáticas, está claramente condicionada por la cantidad de agua y por supuesto por la forma y dimensiones del cauce que la contiene.

El muestreo por secciones transversales, es una forma objetiva y sistematizada el muestreo en unidades más fácilmente evaluables y abordables de forma independiente, que se supone representan una determinada longitud del río.

2.3.15. Método del perímetro mojado.

Este método se basa en la hipótesis de que existe una relación directa entre el hábitat piscícola y la parte mojada de la sección del cauce (Rosse *et al*, 1976; Randolph y White, 1984), lo cual tiene cierto sentido.

La masa de agua, que circula por el cauce está limitada por el fondo o lecho, por los dos bancos laterales y por la superficie libre en contacto con la atmósfera.

El perímetro mojado es la suma de la anchura del lecho y la longitud transversal de los bancos laterales. Por ello, a mayor caudal y manteniéndose constante la forma del lecho, el perímetro mojado será mayor y también lo será el espacio vital utilizable por los peces.

Se utilizan también datos de velocidad, profundidad y naturaleza del sustrato medidos en varios puntos de zonas de aguas rápidas, ya que estas zonas presentan mayor sensibilidad frente a las variaciones de caudal. A un determinado caudal corresponderá una velocidad media de la sección que puede ser despejada de la fórmula del gasto:

$$\text{CAUDAL} = \text{VELOCIDAD SUPERFICIE DE LA SECCIÓN} (Q = VS) \quad (9)$$

Utilizando por ejemplo la fórmula de Manning, que obtiene la velocidad (V) en función del coeficiente de rugosidad (η), de la pendiente longitudinal (I), de la superficie de la sección (S) y del perímetro mojado (P) según la expresión:

$$V = \frac{\left(\frac{S}{P}\right)^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}}}{\eta} \quad (10)$$

Se puede determinar el perímetro mojado para distintos caudales a los que corresponderá una determinada velocidad media de la sección.

De esta forma, se obtiene una serie de pares de valores caudal/perímetro mojado, que pueden representarse de forma gráfica.

El resultado es una curva creciente, cóncava hacia el eje de abscisas que al principio crece rápidamente, disminuyendo posteriormente su tasa de crecimiento de forma considerable. Presenta un punto de inflexión bien marcado, a partir del cual los aumentos en el caudal conllevan pequeños incrementos del perímetro mojado; es precisamente este punto de inflexión el que nos marca el caudal mínimo (ver figura 2)

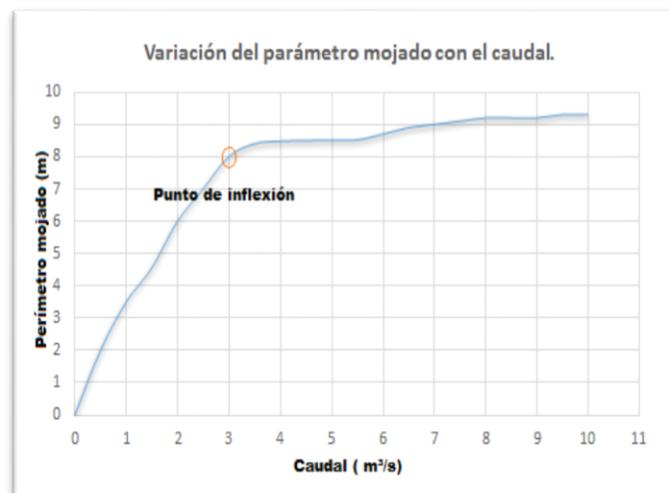


Figura 2. Variación del perímetro mojado en función del caudal circulante. Construcción propia

2.3.16. Método de conservación de los hábitais de Nehring.

El método de Nehring (1979) propugna el mantenimiento de determinadas características del hábitat fluvial que, según el autor, son condiciones mínimas para la no desnaturalización del ecosistema fluvial. Para ello, se recomienda utilizar un caudal que satisfaga al menos dos de tres condiciones preestablecidas en cuanto a la profundidad, la velocidad del agua o el perímetro mojado.

Es decir, el caudal se determinará en función de una combinación deseada de dos de los tres parámetros citados; por ejemplo, buscaremos un caudal que mantenga una profundidad y una velocidad en concreto, o que nos proporcione cierta cantidad de perímetro mojado en la sección con una velocidad media también preestablecida.

El cálculo del caudal puede realizarse por aplicación de fórmulas, que incluyan como variables independientes los valores preestablecidos (por ejemplo la fórmula de Manning manteniendo constante el perímetro mojado y la velocidad, o la fórmula del gasto fijando la velocidad y la profundidad media, o combinaciones de las dos fórmulas). Según Nehring, el caudal mínimo será aquel que proporcione una profundidad media, comprendida entre 12 cm y un cincuentavo de la anchura del cauce ($b/50$ cm).

2.3.17. Método de Fleckinger.

Es un método empírico, pero tiene en consideración varios parámetros morfológicos del cauce y la biota en él presente (Fleckinger, 1980). Consiste en analizar una serie de secciones o transectos con distintas anchuras y regímenes de corriente (distintas velocidades). Se establecen distintas hipótesis de reducción del caudal y utilizando unas tablas empíricas se obtienen las nuevas condiciones de velocidad, profundidad, anchura, etc. Como caudal mínimo se toma aquel que permite un reparto adecuado entre las distintas zonas de remansos y de rápidos.

El caudal mínimo a obtener está, según Fleckinger, íntimamente correlacionado con la especie piscícola en cuestión. Según las experiencias de este autor, el caudal mínimo suele ser un 30% del caudal de estiaje y del 7 al 9% del caudal medio anual, según se trate de un periodo normal o deficitario respectivamente. Hay que tener en cuenta, que está desarrollado para los ríos franceses en los que existe una marcada componente nival o al menos pluvio-nival, que hace que el estiaje no sea tan marcado como en los ríos de la Península Ibérica, con un coeficiente de irregularidad muchísimo menor que el de la mayoría de nuestros ríos.

2.3.18. Método de García Dávila.

El método desarrollado por García Dávila (Fernández *et al.*, 1991), establece el caudal mínimo en base a la existencia de poblaciones de salmónidos. Se basa en el comportamiento hidráulico de diferentes pozas o remansos del río en cuestión, estudiando las condiciones de la salida del agua de la poza, de forma, que no queden zonas del río en seco, y que se permita la libre circulación de los peces. Estas

zonas, susceptibles de quedar en seco, serían las de aguas rápidas de los tramos de menor profundidad media, que interconectan las tablas y pozas (ver figura 3).

Se evalúan una serie de parámetros hidrológicos, como son: el caudal medio anual o módulo, el caudal medio mensual, el caudal medio diario, el caudal de avenida, el caudal generador del lecho, el caudal superado 347 días al año (Q347), y el caudal de infiltración a través del lecho en función de la granulometría del sustrato. Se calcula, posteriormente, el caudal que rebosa de las pozas, por aplicación de las fórmulas de vertederos en pared gruesa. El caudal mínimo se halla en función de este caudal, descontando el de infiltración y de forma que se satisfagan las condiciones de profundidad media recomendadas por Nehring.

Resulta un método algo laborioso debido a la cantidad de parámetros a determinar, si bien, los indispensables son el caudal de infiltración y el caudal de reboso, ya que los otros corresponden más bien a un estudio hidrológico que orienta sobre la fenología del tramo en cuestión.

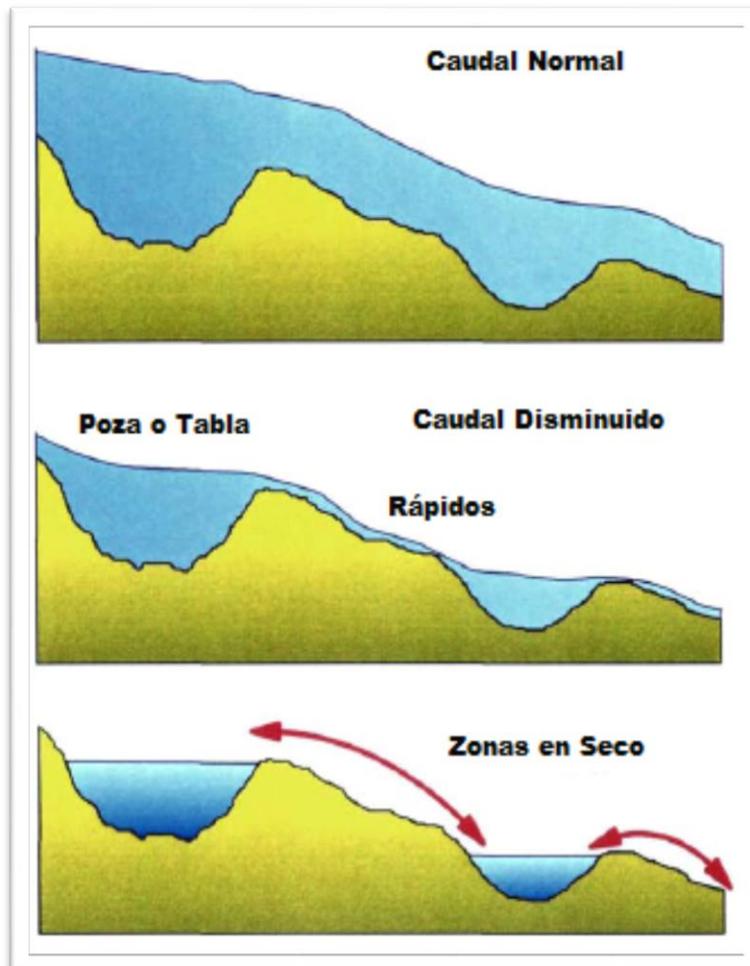


Figura 3. Zonas de mayor sensibilidad ante la disminución de caudal (zonas críticas). Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos, adaptación del método Ifim-phabsim y aplicación a los ríos españoles, (Martin Mayo. 2000)

2.3.19. Análisis incremental.

Según fueron avanzando los conocimientos sobre el ecosistema fluvial y sobre evaluación del hábitat en particular, los métodos anteriores fueron complementándose y perfeccionándose. Los avances en los conocimientos sobre la ecología de algunas especies piscícolas, y en especial los relacionados con el estudio y cuantificación del hábitat, proporcionaron las bases del análisis incremental (Stalnaker & Amette, 1976).

Numerosos estudios científicos corroboran que las necesidades de los peces están íntimamente relacionadas con variables que definen el medio, tanto los parámetros físicos (velocidad, profundidad, cobertura), como los químicos (temperatura, pH, nivel de oxígeno disuelto). Por otra parte, estudios de comportamiento han puesto de manifiesto el fuerte instinto territorial de algunos salmónidos y la densodependencia, que condiciona la cuantía de las existencias poblacionales. Estos estudios están muy avanzados en el caso de la familia de los salmónidos y, especialmente, en la trucha común. Las conclusiones extraídas de toda esta información sientan la hipótesis de que, al reducir el caudal, el factor limitante es la disponibilidad de territorios. El análisis incremental plantea un estudio del hábitat, mediante la evaluación de secciones transversales del río.

En cada una de estas secciones se determina un número de celdas individuales, en las que se observa como varían los distintos parámetros físicos, químicos y del hábitat, en función de la cantidad de agua que las atraviesa; es decir, en relación con los distintos caudales circulantes. Se obtienen así unas curvas de evolución del hábitat en función del caudal.

Con posterioridad, se han ido obteniendo las llamadas funciones de preferencia, curvas de preferencia o de probabilidad de uso de las especies piscícolas con respecto a los parámetros físicos, químicos y de cobertura del hábitat fluvial; esto ha supuesto una evolución de este método hacia el descrito a continuación.

2.3.20. Método de microhábitats.

Evaluado el hábitat fluvial por los métodos anteriormente expuestos, y obtenidas sus relaciones con el caudal circulante, se efectúa un análisis final de las exigencias o necesidades de las especies con respecto al hábitat (Bovee y Milhous, 1978; Trihey, 1979; Stalnaker, 1980). Se utilizan para ello, las curvas de preferencia citadas, que incluso consideran diferentes estadías vitales de la especie en cuestión (desove, alevines, juveniles, adultos).

Existen curvas de preferencia para distintos parámetros, siendo las más utilizadas las que expresan las preferencias de profundidad, velocidad del agua, sustrato y cobertura. Para cada caudal circulante, y por aplicación de estas curvas, se puede conocer la mayor o menor disponibilidad de hábitat que se traduce en una superficie útil a disposición de los peces. Esto nos permitirá tomar decisiones a la hora de fijar un caudal mínimo, de forma que esa superficie sea suficiente para el desarrollo y permanencia de las poblaciones, Estos dos últimos métodos constituyen la base de la metodología IFIMPUABSIM.

2.3.21. Metodología IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*).

La metodología IFIM fue desarrollada por el U.S. Fish and Wildlife Service en colaboración con un equipo multidisciplinario, basándose en el conocimiento y descripción básicos de las interrelaciones existentes entre la cantidad de agua circulante y la cantidad de hábitat que genera en un tramo de cauce. IFIM parte de la base de los siguientes principios fundamentales:

- 1) Los requerimientos de caudal de un río es el flujo necesario para mantener las condiciones del ecosistema en niveles ambientales aceptables.
- 2) El caudal más deseable es aquel que satisface numerosos usos a la vez.
- 3) Debe darse una consideración preferencial a aquellos usos de mayor relevancia.
- 4) Un aspecto de suma importancia es el efecto de la alteración del caudal sobre los recursos biológicos.

El IFIM incluye un sistema de simulación de hábitat de tiempo modular (PHABSIM), que está compuesto una librería de modelos de simulación interconectadas, estos modelos permiten describir las características temporales y espaciales del hábitat que resulta de una determinada alternativa de regulación de un río.

Esta metodología es de tipo adaptativa, en el sentido de que los distintos modelos que la componen pueden ser combinados para adaptarse con distintos escenarios de análisis.

La metodología IFIM es un proceso que incluye cuatro actividades o fases interrelacionadas: Identificación y diagnóstico del problema, planificación del estudio, implementación del estudio, finalmente el análisis de alternativas y la resolución del problema. (Zeus R, 2006)

2.4. Otros métodos.

Son abundantes los métodos que se basan en un análisis del hábitat y de los condicionantes hidráulicos, con mayor o menor complejidad, según los casos y adaptados a muy diferentes localidades o tipos de ríos. Wesche & Rechar (1980) recopilan sesenta métodos utilizados en Estados Unidos, a modo de ejemplo y basados en IFIM cabe citar:

- Método de Waters (Waters, 1976).
- Método de Oregón (Thompson, 1972,1974).
- Método de Oregón de la anchura ponderada útil (Sams & Pearson, 1963).
- Método de la Región 4 (Arkansas, Tennessee, Carolina del norte y del sur, Louisiana, Mississippi, Alabama, Georgia y Florida), del US Fisheries Service (Dunham & Collotzi, 1975; Barstchi, 1976).
- Método de la Región 6 (Montana, Dakota del norte y del sur, Wyoming, Nebraska, Utah, Colorado y Kansas), del US Fisheries Service (Swank & Phillips, 1976).
- Método de Idaho (White & Cochnauer, 1975).

2.4.1. Métodos Holísticos.

Finalmente los métodos Holísticos constituyen una aproximación a una visión global del río, basada en la teoría de ecosistemas fluviales, en la que los caudales son el soporte básico para el ecosistema fluvial. Es la metodología que más volumen de información requiere, la más compleja y detallada. (Parras, 2012)

2.5 Ubicación de caudales ecológicos en El Salvador.



Figura 4. Ubicación de caudales ecológicos en El Salvador. Fuente: Elaboración del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias.

Tabla 2. Estadística hidrológica por departamento año 2014 en El Salvador. (MARN, 2014)

Departamento: Ahuachapán

Estación El Jobo – Río Paz, Periodo de registro: Mayo 2002 – Abril 2014*
 Caudal promedio multianual: 17.53 m³/seg
 Caudal máximo registrado (12 Octubre 2011): 2350 m³/seg
 Caudal mínimo registrado (24 Abril 2007): 4.88 m³/seg

Estación La Hachadura – Río Paz, Periodo de registro: Mayo 1962 - Abril 2010*
Caudal promedio multianual: 26.03 m³/seg
Caudal máximo registrado (24 Junio 1972): 2856 m³/seg
Caudal mínimo registrado (14 Agosto 1962): 2.93 m³/seg

* Periodo no continuo.

Departamento: Sonsonate

Estación Santa Emilia – Río Sensunapán, Periodo de registro: Agosto 2013 – Abril 2014
Caudal promedio multianual: ---
Caudal máximo registrado (11 Octubre 2013): 310 m³/seg
Caudal mínimo registrado (27 Abril 2014): 4.78 m³/seg

Estación La Atalaya – Río San Pedro, Periodo de registro: Mayo 1969 – Abril 2014*
Caudal promedio multianual: 3.00 m³/seg
Caudal máximo registrado (1 Noviembre 1985): 391.37 m³/seg
Caudal mínimo registrado (27 Abril 1982): 0.44 m³/seg

* Periodo no continuo.

Departamento: Santa Ana

Estación Montecristo – Río San José, Periodo de registro: Mayo 2013 – Abril 2014
Caudal promedio multianual: ---
Caudal máximo registrado (16 Septiembre 2013): 5 m³/seg
Caudal mínimo registrado (10 Marzo 2014): 0.02 m³/seg

Estación Piedra Cargada – Río Guajoyo, Periodo de registro: Mayo 2002 – Abril 2011
Actualmente aforos
Caudal promedio multianual: 1.60 m³/seg
Caudal máximo registrado (6 Octubre 2009): 145 m³/seg
Caudal mínimo registrado (25 Mayo 2007): 0.08 m³/seg

Estación El Zapotillo – Río Lempa, Periodo de registro: Mayo 1971 – Abril 2014*
Caudal promedio multianual: 60.83 m³/seg
Caudal máximo registrado (3 Octubre 1971): 2,250 m³/seg
Caudal mínimo registrado (1 Mayo 2013): 1.04 m³/seg

Estación Paso del Oso – Río Lempa, Periodo de registro: Mayo 1971 – Abril 2010*
Actualmente aforos

Caudal promedio multianual: 62.75 m³/seg
Caudal máximo registrado (3 Octubre 1971): 2,264 m³/seg
Caudal mínimo registrado (7 Abril 1978): 0.87 m³/seg

*** Periodo no continuo.**

Departamento: Chalatenango

Estación Citalá – Río Lempa, Periodo de registro: Mayo 1973 – Octubre 2008*

Actualmente aforos

Caudal promedio multianual: 19.82 m³/seg

Caudal máximo registrado (8 Junio 1969): 1,162.60m³/seg

Caudal mínimo registrado (3 Junio 1993): 0.41m³/seg

Estación El Tamarindo – Río Lempa, Periodo de registro: Mayo 2002 – Abril 2005

Caudal promedio multianual: 60.35m³/seg

Caudal máximo registrado (30 Septiembre 2004): 1,149m³/seg

Caudal mínimo registrado : ---

Estación La Sierpe – Río Tamulasco, Periodo de registro: Junio 1974 – Abril 2012*

Actualmente aforos

Caudal promedio multianual: 2.02 m³/seg

Caudal máximo registrado (19 Septiembre 2006): 185 m³/seg

Caudal mínimo registrado (11 Abril 1996): 0.01 m³/seg

Estación Los Navarrete – Río Sumpul, Periodo de registro: Junio 2013 – Enero 2014

Actualmente aforos

Caudal promedio multianual: ---

Caudal máximo registrado (17 Septiembre 2013): 100 m³/seg

Caudal mínimo registrado : ---

* Periodo no continuo.

Departamento: La Libertad

Estación Tacachico – Río Suquiapa, Periodo de registro: Enero 1960 – Abril 2014*

Caudal promedio multianual: 5.97 m³/seg

Caudal máximo registrado (19 Septiembre 1982): 390.09 m³/seg

Caudal mínimo registrado (1 Mayo 1977): 0.89 m³/seg

Estación Las Pavas – Río Suquiapa, Periodo de registro: Mayo 1969 – Abril 2014*
Caudal promedio multianual: 7.92 m³/seg
Caudal máximo registrado (22 Agosto 1998): 590 m³/seg
Caudal mínimo registrado (19 Mayo 1998): 0.85 m³/seg

Estación Ateos – Río Talnique, Periodo de registro: Enero 1961 – Mayo 1965;
Julio 2013 – Abril 2014
Caudal promedio multianual: 2.49 m³/seg
Caudal máximo registrado (19 Agosto 1964): 150.05 m³/seg
Caudal mínimo registrado (25 Noviembre 1963): 0.05 m³/seg

Estación Joya de Cerén – Río Sucio, Periodo de registro: Mayo 2002 – Marzo 2013
Actualmente aforos
Caudal promedio multianual: 7.11 m³/seg
Caudal máximo registrado (30 Mayo 2010): 180 m³/seg
Caudal mínimo registrado (6 Mayo 2002): 1.41 m³/seg

Estación El Jocote – Río Sucio, Periodo de registro: Mayo 1967 – Abril 2011*
Actualmente aforos
Caudal promedio multianual: 10.57 m³/seg
Caudal máximo registrado (5 Octubre 2005): 466.36 m³/seg
Caudal mínimo registrado (23 Marzo 1988): 2.63 m³/seg

Estación Los Dos Cerros – Río Sucio, Periodo de registro: Noviembre 2006 – Septiembre
2008 Actualmente aforos
Caudal promedio multianual: 8.89 m³/seg
Caudal máximo registrado (21 Octubre 2007): 170 m³/seg
Caudal mínimo registrado (17 Mayo 2007): 0.49 m³/seg

* Periodo no continuo.

Departamento: San Salvador

Estación Guazapa – Río Acelhuate, Periodo de registro: Mayo 1967 – Abril 2014*
Caudal promedio multianual: 6.82 m³/seg
Caudal máximo estimado (7 Noviembre 2009): 1137.09 m³/seg
Caudal mínimo registrado (10 Mayo 1981): 1.24 m³/seg

* Periodo no continuo.

Departamento: Cabañas

Estación San Isidro – Río Titihuapa, Periodo de registro: Mayo 2013 – Junio 2014
Caudal promedio multianual: 2.63 m³/seg
Caudal máximo registrado (3 Octubre 2013): 157 m³/seg
Caudal mínimo registrado (10 Abril 2013): 0.71 m³/seg

Departamento: La Paz

Estación Puente Viejo – Río Jiboa, Periodo de registro: Mayo 2002 – Junio 2005
Mayo 2013 – Junio 2014.

Caudal promedio multianual: 2.82 m³/seg
Caudal máximo registrado (7 Octubre 2003): 270 m³/seg
Caudal mínimo registrado (26 Enero 2003): 0.64 m³/seg

Departamento: San Vicente

Estación La Quesera – Río Acahuapa, Periodo de registro: Mayo 2013 – Junio 2014
Caudal promedio multianual: ---
Caudal máximo registrado (17 Octubre 2003): 77 m³ /seg
Caudal mínimo registrado: ---

Departamento: Usulután

Estación San Marcos – Río Lempa, Periodo de registro: Enero 1960 – Abril 2009*
Caudal promedio multianual: 363.81 m³/seg
Caudal máximo registrado (4 Septiembre 1969): 8921 m³/seg
Caudal mínimo registrado (5 Febrero 1962): 4.00 m³/seg

Estación Vado Marín – Río Grande de San Miguel, Periodo de registro: Mayo 1959 –
Abril 1999*
Caudal promedio multianual: 27.08 m³/seg
Caudal máximo registrado (2 Noviembre 1998): 1599.33 m³/seg
Caudal mínimo registrado (14 Marzo 1979): 2.16 m³/seg

Estación Moropala – Río Grande de San Miguel, Periodo de registro: Mayo 2013 – Abril
2014
Caudal promedio multianual: ---

Caudal máximo registrado (11 Septiembre 2013): 143 m³/seg

Caudal mínimo registrado: ---

* Periodo no continuo.

Departamento: Morazán

Estación Osicala – Río Torola, Periodo de registro: Enero 1962 – Abril 2014

Caudal promedio multianual: 31.86 m³/seg

Caudal máximo registrado (14 Septiembre 1966): 4480 m³/seg

Caudal mínimo registrado(26 Julio 1962): 0.12 m³/seg

* Periodo no continuo.

Departamento: San Miguel

Estación Campo Aventura / Villerías – Río Grande de San Miguel, Periodo de registro:

Enero 1970 – Abril 2014*

Caudal promedio multianual: 14.05 m³/seg

Caudal máximo registrado (16 Septiembre 1973): 1148 m³/seg

Caudal mínimo registrado (13 Mayo 1976): 0.61 m³/seg

Estación El Delirio / La Canoa – Río Grande de San Miguel Periodo de registro: Enero

1963 – Abril 2008 Actualmente aforos*

Caudal promedio multianual: 20.75 m³/seg

Caudal máximo registrado (9 Noviembre 1963): 631 m³/seg

Caudal mínimo registrado (28 Noviembre 1966): 0.42 m³/seg

* Periodo no continuo.

Departamento: La Unión

Estación Concepción de Oriente – Río Goascorán, Periodo de registro: Mayo 2004 – Abril

2008 Actualmente aforos

Caudal promedio multianual: 14.75 m³/seg

Caudal máximo registrado (26 Septiembre 2004): 535 m³/seg

Caudal mínimo registrado (1 Mayo 2005): 0.39 m³/seg

Estación Ceiba / Los Horcones – Río Goascorán, Periodo de registro: Agosto 2002 –

Octubre 2009 Actualmente aforo

Caudal promedio multianual: 33.45 m³/seg

Caudal máximo registrado (22 Octubre 2006): 2649.9 m³/seg

Caudal mínimo registrado (12 Enero 2003): 0.44 m³/seg

A continuación se presenta un esquema genérico para la determinación del caudal ecológico y aplicación de las metodologías antes expuestas.

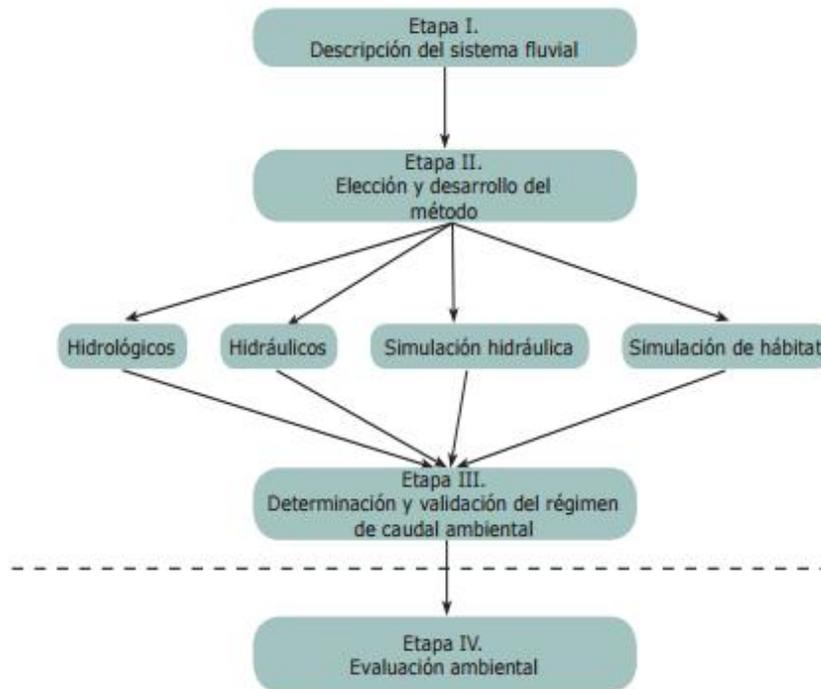


Figura 5. Esquema de procedimiento genérico para encontrar el caudal ecológico. Fuente: EcoHyd, 2011

Capítulo 3. Estudio de Caso de Estimación del Caudal Ecológico en el río Sensunapán o Grande de Sonsonate.

3.1 Introducción.

El objetivo del establecimiento de un régimen de caudales ecológicos es mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico del río. (Antoni Palau. 2012)

En este estudio se aplican los denominados métodos hidrológicos, que definen un régimen con base en el análisis del patrón de caudales actual o al teóricamente natural.

Se exponen los resultados obtenidos con la aplicación de distintos métodos, para posteriormente comparar dichos resultados y hacer una primera propuesta de régimen de caudal ecológico.

Se ha querido exponer los resultados derivados de diferentes procedimientos de cálculo, desde las alternativas más simplistas y de menor base ecológica, hasta aquellas que más en cuenta tienen la variabilidad propia del río Sensunapán.

3.2. Datos generales.

La cuenca del río Sensunapán o Grande de Sonsonate se encuentra en el departamento de Sonsonate, El Salvador (Figura 6), y conforma la Región Hidrográfica D (Esta identificación de las áreas parte de la regionalización hidrográfica hecha en el país, a partir del Plan de Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos PLANDARH 1979-1982).

La cuenca limita al norte con los municipios de Ahuachapán, Atiquizaya y Chalchuapa, al este con Izalco, al oeste con San Pedro Puxtla y Santo Domingo de Guzmán, y finalmente hacia el sur con el océano Pacífico (USAID/DAI, 2009).

Es un territorio compartido por 13 municipios: desde la parte alta hacia la costa incluye Ahuachapán, Atiquizaya, Chalchuapa, Juayúa, Salcoatitán, Apaneca, Nahuizalco, Santa Catarina Masahuat, Sonsonate, Sonzacate, San Antonio del Monte, Nahuilingo y Acajutla (Figura 7).

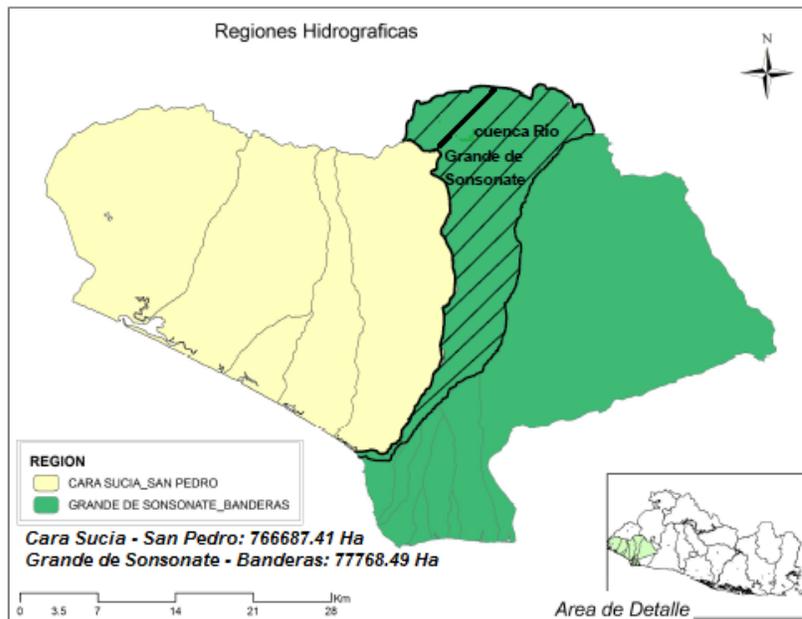


Figura 6. Ubicación de la región hidrográfica Grande de Sonsonate-Banderas dentro del territorio de El Salvador. Proyecto USAID – Manejo de cuencas hidrográficas (febrero 2009).

La cuenca comprende los ríos Ceniza y Sensunapán o Grande de Sonsonate, que drenan desde la zona montañosa del departamento de Sonsonate hacia la zona costera. El cauce principal del río Sensunapán se forma a partir de las aportaciones de varios ríos tributarios (figura 7). Entre ellos se encuentran:

- Tramo superior: ríos Ceniza, Ocuila, Bebedero, y quebradas de invierno recogen la escorrentía de la parte alta de la cuenca, cubierta mayormente por plantaciones de café y bosques naturales.
- Tramo medio: recibe tributarios como el río Frío, Julupe y Nezapán. El cauce principal, se forma de la unión del río Papaloate, río Grande y río Las Monjas o Los Trozos.
- Tramo inferior, recibe el tributario Cuyuapa, proveniente del sector de Santa Catarina Masahuat.

El cauce del río Sensunapán corre por una distancia de 37.35 km (USAID/DAI, 2009), desde la altura de Cordillera Apaneca Ilamatepec hasta su desembocadura en la Bocana y manglar en el municipio de Acajutla. Adicionalmente, existen 73 quebradas que drenan hacia el río Sensunapán.

El área de la cuenca es de 219.32 km², con un perímetro de 107.5 km y una pendiente media del 23 %, presentando mayores pendientes en la cuenca alta, llegando a identificarse pendientes mayores a 70 % y en la zona media se encuentran entre el 15 y 30 % (Tabla 3 y Figura 8).

La elevación máxima es de 1,700 msnm, la media de 850 msnm y la elevación mínima de 0.00 msnm.

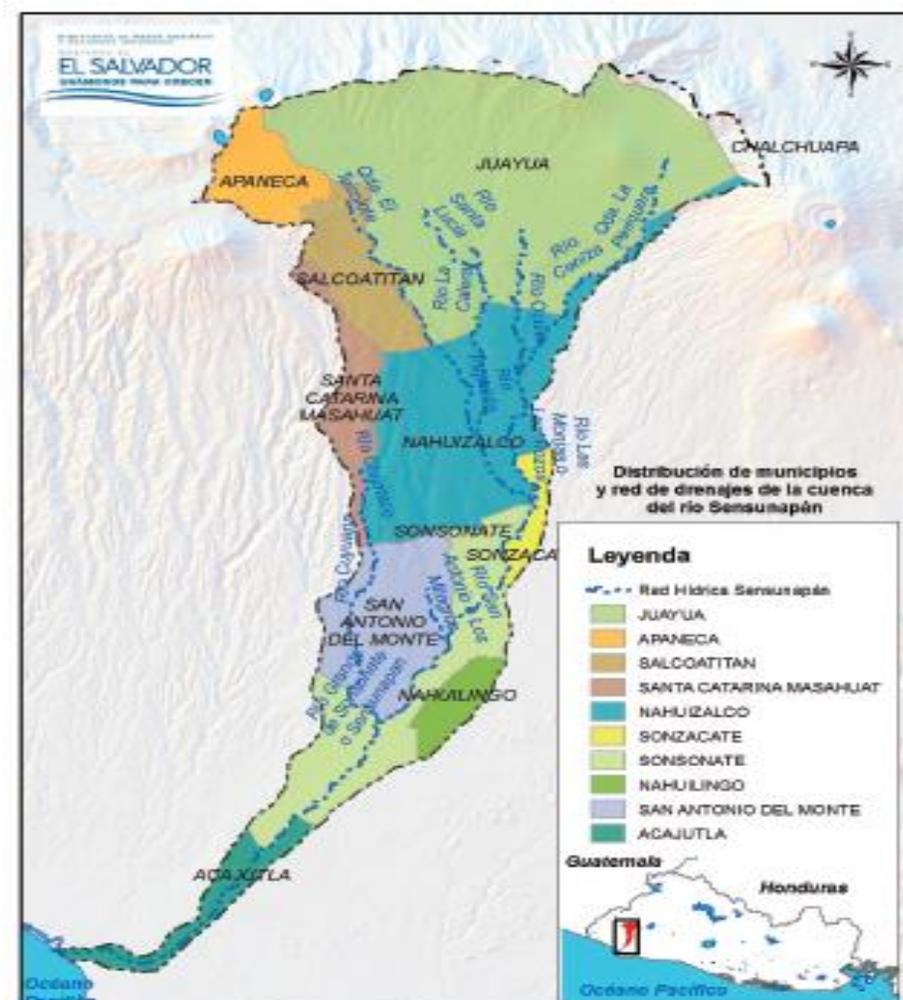


Figura 7. Distribución de municipios y red de drenaje en la cuenca del río Sensunapán. (MARN, 2013)

Tabla 3. Distribución de áreas de pendientes en la cuenca del río Sensunapán. Fuente: Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos (MARN, 2016)

Rango pendiente	Área (ha)
15% - 30%	7,238.68
30% - 50%	2,220.76
50% - 70%	589.70
Mayor que 70%	342.29
Menor que 15%	11,633.54

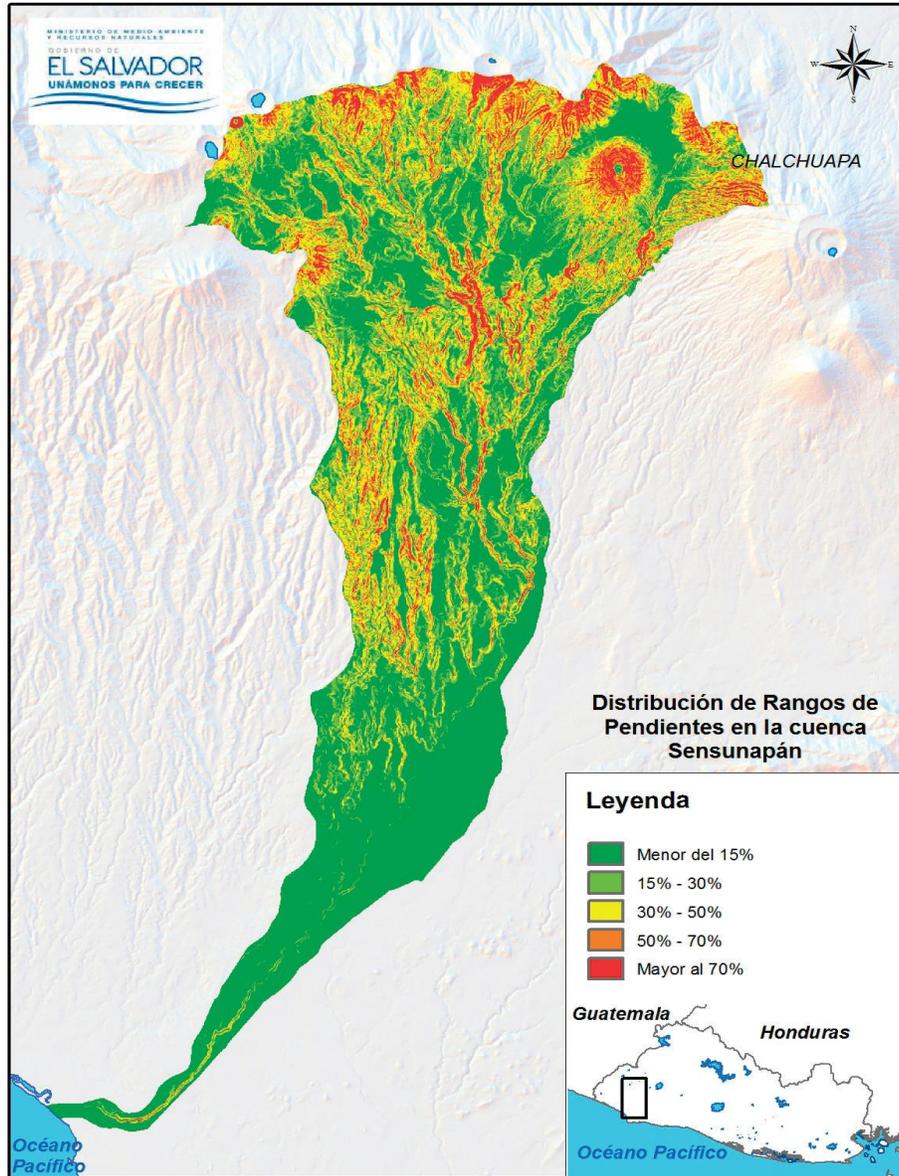


Figura 8. Distribución de los rangos de pendientes en la cuenca del río Sensunapán. (MARN, 2016)

En la cuenca predominan los suelos del tipo andisoles (78.11 %), existiendo también otros tipos de suelo en menor proporción como los aluviales (12.71 %), grumosoles (6.28 %), latosoles arcillo rojizos (1.42 %), litosoles (0.87 %) y regosoles o halomórficos (0.62 %). Por otro lado, la mayoría de los suelos en El Salvador presenta textura arcillosa (andosoles, latosoles y grumosoles) (MARN, 2013), que condicionan su facilidad de manejo con fines productivos.

Cuando están húmedos son pesados y difíciles de trabajar debido a sus propiedades plásticas mientras que cuando se secan se vuelven duros y compactos reduciéndose la efectividad de las labores. Los suelos andisoles, provenientes de la formación geológica San Salvador, se ubican en la parte alta y media de la cuenca y presentan características de buena permeabilidad y profundidad, con textura de

franca a franca arenosa, lo que les confiere una buena condición de drenaje y retención de agua, así como de afloramientos de agua que generan cascadas, dada la topografía en la parte alta de la cuenca. El uso de suelo que predomina en la cuenca es el cultivo del café, el cual genera protección a los suelos frente a la erosión y contribuye a la retención de agua y a la infiltración.

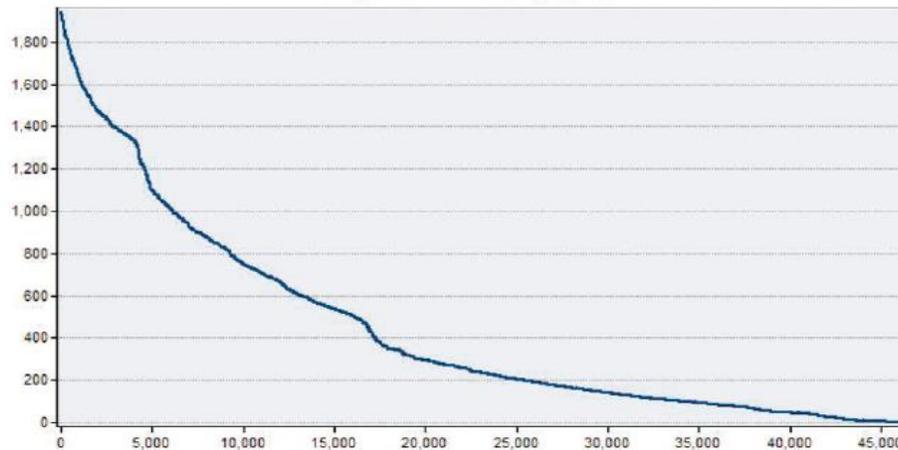


Figura 9. Perfil del río Sensunapán (los ejes representan el rango altitudinal y la longitud total atravesada por el cauce del río). (Fuente: MARN)

Por lo que respecta a la población residente en la cuenca, según el censo de 2007, su número ascendía a 254,387 habitantes (Tabla 4 y Figura 10).

Tabla 4. Distribución de la población entre los diferentes municipios ubicados en la cuenca del río Sensunapán (datos del censo de 2007 – (Fuente: MARN).

Municipio	Habitantes (No)
Acajutla	10,043
Apaneca	2,795
Juayúa	24,465
Nahuizalco	41,468
Nahulingo	1,852
Salcoatitán	5,484
San Antonio del Monte	25,594
Santa Catarina Masahuát	5,880
Sonsonate	41,773
Sonzacate	13,752
Total	173,106

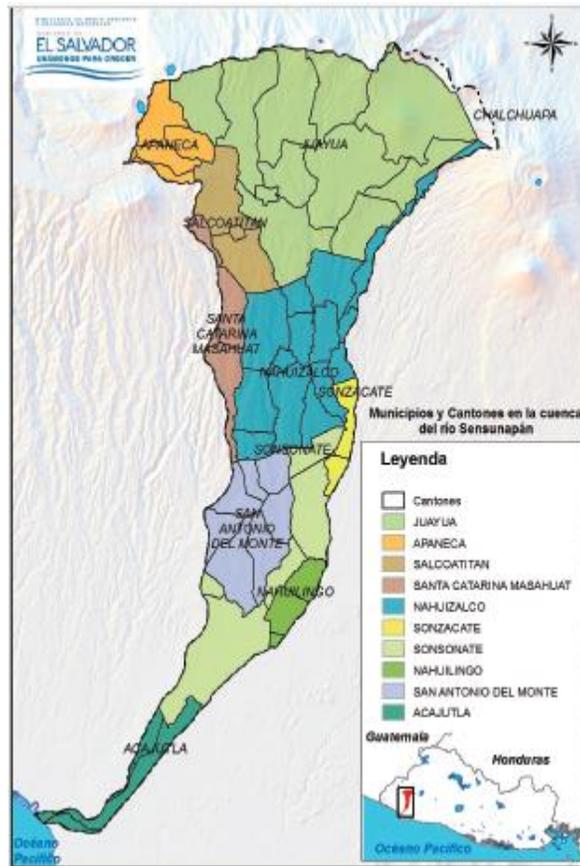


Figura 10. Municipios y cantones localizados dentro de la cuenca del río Grande de Sensunapán. (Fuente: MARN)

Tal y como se puede observar en la Tabla 4., la población total de la cuenca asciende a 173.106 habitantes, de los cuales las mayores concentraciones se encuentran en los territorios que corresponden a los municipios de Sonsonate, Nahuizalco, San Antonio del Monte y Juayúa. Las ciudades de Sonzacate y San Antonio del Monte se distinguen por la presencia de características urbanas por su proximidad con la cabecera departamental de Sonsonate. Mientras que Juayúa, Salcoatitán y Nahuizalco presentan características de población rural y presencia indígena. El municipio de Acajutla se diferencia del resto por ser una ciudad portuaria.

3.3. Datos hidrometeorológicos.

De acuerdo a la Zonificación Climática de Köppen (Atlas de El Salvador, sf), la cuenca del río Sensunapán presenta los cuatro tipos de clasificación:

- 0-800 msnm: Sabanas Tropicales Calientes o Tierra Caliente, con temperaturas medias de 22 a 27° C. Corresponde a los municipios de Acajutla, Sonsonate, San Antonio del Monte, Sonzacate y Nahuizalco.

- 800-1200 msnm: Sabanas Tropicales Calurosas o Tierra Templada. Es la zona intermedia entre los municipios de Nahuizalco y Salcoatitán.
- 1200-1800 msnm. Tierra Templada. Municipios: Salcoatitán y Juayúa.
- 1800-2700 msnm. Tierra Fría. Es la zona más al norte de la cuenca, o sea, áreas adyacentes a la divisoria de cuenca o parte aguas.

La cuenca del río Sensunapán presenta una precipitación media anual de 2074 mm (frente a los 1800 mm anuales del promedio nacional), de la cual el 93 % se distribuye en los meses de mayo a octubre. Los meses más lluviosos corresponden a junio y septiembre, con cantidades de lluvia en promedio de 386 y 427 mm respectivamente, y los más secos a los meses de enero y febrero, con cantidades inferiores a los 4 mm. Las precipitaciones descienden en las zonas bajas de la cuenca (*Tabla 5*).

Tabla 5. Rango de precipitación anual (mm) en los municipios de la cuenca del río Sensunapán (Fuente: MARN)

Municipio	Precipitación (mm lluvia anual)
Juayúa	2100 - 2400
Salcoatitán	2100 - 2400
Nahuizalco	2100 - 2400
Sonzacate	1700 - 1900
San Antonio del Monte	1700 - 1900
Sonsonate	1500 - 1700
Acajutla	1500 - 1700

Debido a sus características climáticas, edafológicas, geológicas y de vegetación, la cuenca del río Sensunapán presenta una buena producción hídrica evidenciada especialmente en los nacimientos de agua y cascadas que nacen en su parte alta y media. Los registros de caudal existentes en la cuenca datan del periodo 1959 a 1982, incluyen registros continuos de caudales medios, máximos y mínimos en la estación hidrométrica Sensunapán, ubicada aguas abajo de la ciudad de Sonsonate.

Desde el año 2012 se ha ubicado una nueva estación, Santa Emilia, de la cual todavía no se tienen registros continuos de caudal, tan solo aforos en el periodo de mayo 2012 a junio 2013, Al realizar una comparación de la escorrentía generada en la cuenca con la generada en cuencas vecinas tanto de la región hidrográfica Sonsonate - Banderas como de la región hidrográfica Cara Sucia – San Pedro, la estación Sensunapán presentaba buenos rendimientos en la escorrentía tanto para los caudales de época seca como de época lluviosa (figura 11). De acuerdo a los datos de la estación Sensunapán, la cuenca presenta un rendimiento anual de $0.0254 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ (Balance Hídrico Nacional ,2005).

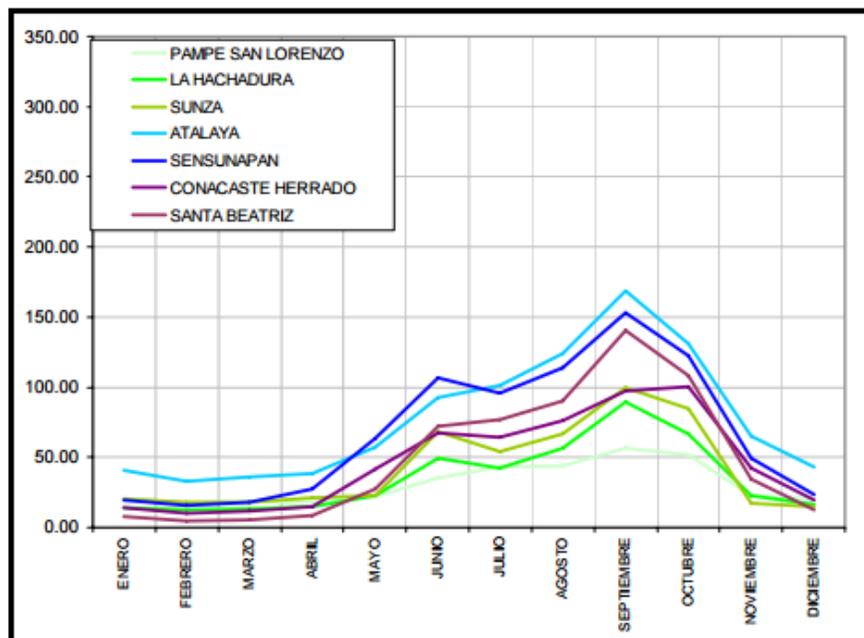


Figura 11. Escorrentía superficial (mm) en cuencas de las regiones hidrográficas Cara Sucia – San Pedro y Sonsonate – Banderas. (Servicio Hidrológico Nacional Balance Hídrico Integrado y Dinámico - 2005)

Tabla 6. Caudales registrados en la central hidroeléctrica de Juayúa. (Fuente: MARN)

Periodos		Caudales (m ³ /s)	
Desde	Hasta	Máximo	Mínimo
22/10/1990	18/12/1990	1.87	1.58
11/01/1991	10/12/1991	1.88	1.61
09/01/1992	27/11/1992	1.77	1.11
25/01/1993	16/12/1993	1.89	1.48
13/01/1994	01/07/1994	1.78	1.53
05/05/2009	30/12/2009	2.77	1.38
02/01/2010	26/01/2010	1.85	1.44

Los principales datos foronómicos existentes corresponden al anuario hidrológico de la estación de Acajutla, a la información recogida en la central hidroeléctrica Juayúa y a los registros establecidos en la cuenca por el Observatorio Ambiental del MARN (Figura 12 y Figura 13):

1. Anuario Hidrológico, MAG. 1969-1979. Estación Sensunapán, ubicada al norte de la ciudad de Acajutla.

Caudales (m³/s): máximo instantáneo: 237.892; promedio: 4.332; mínimo: 0.207

2. EIA central hidroeléctrica Juayúa. Con información de aforos realizados en el río efectuados desde el 25 de mayo de 2009 (111 aforos, 57 % de ellos en la estación lluviosa) y 85 aforos realizados entre 1990 y 1994 (50 % de ellos en la estación lluviosa), se ha estimado un caudal medio del río

en el orden de 1.84 m³/s (tabla 6). Esto genera un rendimiento de 53 l/s/km² para la cuenca, considerado relativamente alto para una lluvia media anual de 1,980 mm.

3. Observatorio Ambiental MARN (Tabla 7).

- Medición 28/04/2011: Mirazalco, donde estuvo estación hidrométrica, El Bebedero: 2.726 m³/s
- Medición 28/04/2011: Chorro La Calera, después del dique la Calera, Chorro La Calera: 0.770 m³/s
- Medición 29/04/2011: 50 m aguas abajo de Hidroeléctrica Papaloate: 0.661 m³/s

Tabla 7. Caudales registrados por el Observatorio Ambiental del MARN en diferentes secciones del río Sensunapán.

Ubicación aforo	Rio	Coordenadas	Rango horario	Q(m3/s)
Mirazalco, donde estuvo estación hidrométrica.	El Bebedero	13°49'56.00"N 89°43'38.00"O	10:45/11:10	2.726
Chorro La Calera, después del dique la Calera	Chorro La Calera	13°50'2.01"N 89°43'37.51"O	13:10/13:25	0.770
Toma de agua La Calera, donde se inicia el túnel para captación de agua.	Toma de agua la Calera	13°50'11.57"N 89°43'59.74"O	13:50/14:05	0.205
Toma de agua la Calera 2	Toma de agua la Calera	13°50'11.57"N 89°43'59.74"O	14:10/14:15	0.571
Medición de agua de túnel de Presa Hidroeléctrica Mirazalco Calera	Túnel de Presa Hidroeléctrica Mirazalco Calera	13°50'2.83"N 89°43'39.86"O	12:40/12:55	1.019
50 m aguas abajo de presa Hidroeléctrica	Papaloate	13°48'9.26"N 89°44'4.16"O	11:55/12:13	0.661
100 m aguas arriba de represa Las Celicias	Papaloate	13°49'16.45"N 89°44'45.30"O	10:30/10:40	0.658

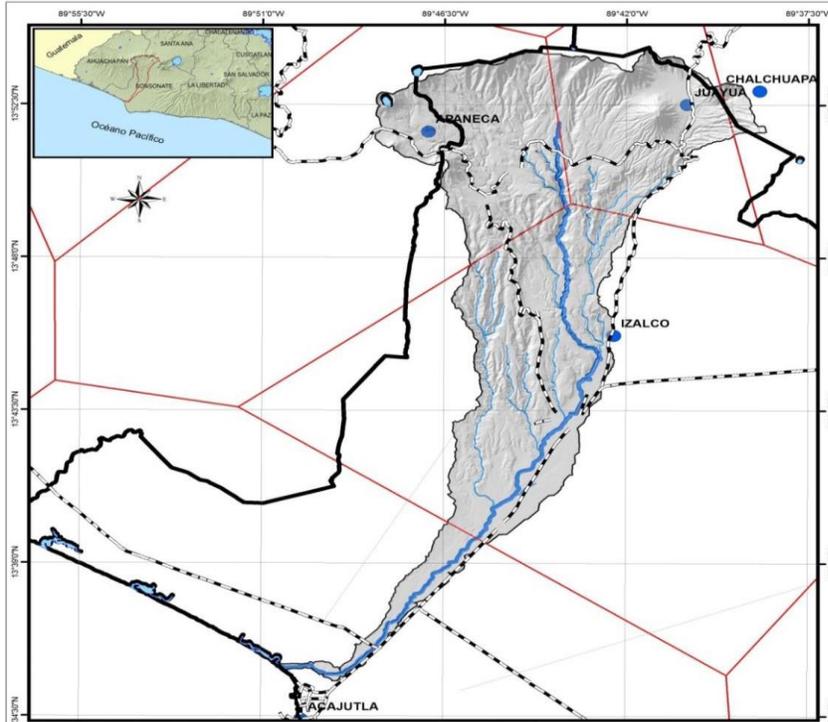


Figura 12. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Sensunapán. Fuente: Análisis hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad, en el departamento de Sonsonate, El Salvador

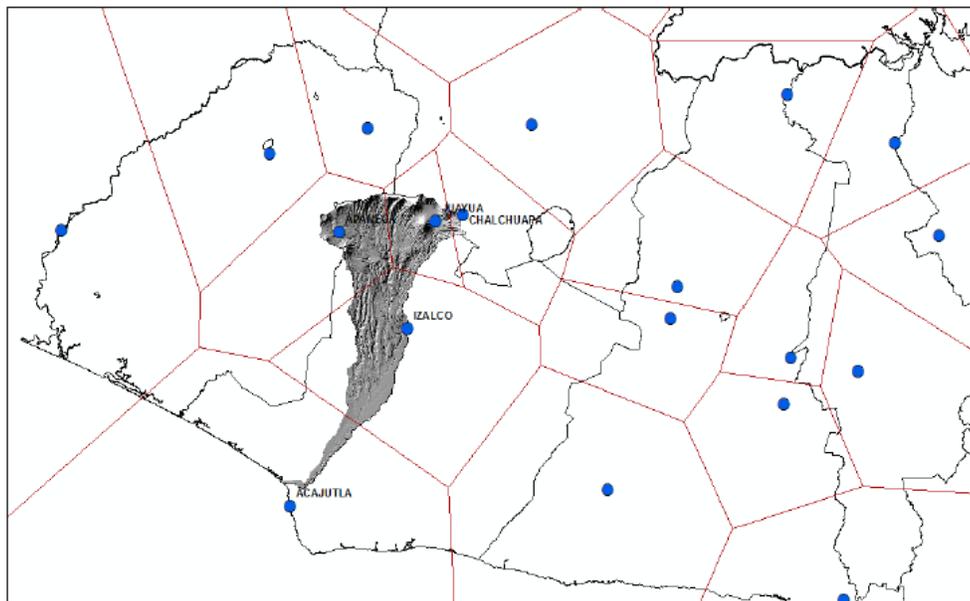


Figura 13. Estaciones climatológicas de El Salvador en la cuenca del río Sensunapán. Fuente: Análisis hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad, en el departamento de Sonsonate, El Salvador.

3.4. Datos sobre calidad de las aguas del río.

En lo que respecta a la calidad sanitaria de las aguas de los ríos, en distintos puntos de muestreo (tabla 8) el Índice de Calidad Sanitaria de las Aguas (ICA) indicaba que las aguas del Sensunapán se debían clasificar como de mala a pésima calidad, presentando altas concentraciones de coliformes fecales, nitrógeno amoniacal, mercurio, arsénico y cromo (MARN, 2012). Dicha contaminación se debe a las descargas de aguas servidas domésticas, agrícolas e industriales que se localizan en la zona.

Al evaluar los resultados de calidad de agua se observa que la mayor limitante de la calidad de agua la presenta los altos recuentos de bacterias coliformes fecales que limitan las distintas aptitudes de uso del agua. En las tablas 9 a la 11 se muestra el detalle de la evaluación de calidad de agua de los ríos en la cuenca (Figura 11).

La Calidad Ambiental valorada a través de la aplicación del Índice de Calidad de Agua General (ICA): de los sitios evaluados ninguno cuenta con una calidad “Excelente” y/o “Buena”; por lo anterior, no existe agua con calidad que permita el desarrollo de vida acuática deseada, es decir, diversidad acuática con equilibrio ecológico. Los resultados del análisis de la calidad general de las aguas superficiales muestran que en la cuenca alta media del río Grande de Sonsonate a la altura del puente de Nahuizalco a Sonzacate y la cuenca media del Río Grande de Sonsonate a la altura de calle a Nahuizalco, Sonsonate presentan una calidad de agua “Regular”, lo que limita el desarrollo de vida acuática. Por otro lado, la cuenca alta del río Grande de Sonsonate, a la altura del Beneficio Tres Ríos y la cuenca baja a la altura de la Hacienda Santa Clara, hasta la estación de ferrocarril antigua, presentan una calidad de agua “Mala” que según el ICA limita el desarrollo de vida acuática.

Según los índices de calidad del agua del río Grande de Sonsonate (ICA):

- ✓ El agua cruda para potabilizar por métodos convencionales de los cuatro sitios de muestreo ubicados en el río Grande de Sonsonate ninguno cumple para potabilizar por métodos convencionales debido a valores fuera de norma de Oxígeno Disuelto, DBO5, Color aparente, Fenoles y recuentos bacterianos de coliformes fecales que oscilan de 2,200 a 33,000 NMP/100 ml.
- ✓ El agua apta para riego de los cuatro sitios de muestreo ubicados en el río Grande de Sonsonate y a pesar de la buena calidad de agua físico-química, ninguno de los sitios evaluados cumple con la utilidad para riego debido a los valores fuera de norma de recuentos bacterianos de coliformes fecales que oscilan de 3,200 a 33,000 NMP/100 ml.
- ✓ El agua apta para usos recreativos con contacto humano de los ocho sitios de muestreo ubicados en los principales ríos de la cuenca, ninguno cumple para actividades recreativas debido a los valores fuera de norma de coliformes fecales, oxígeno disuelto y turbidez.

Tabla 8. Sitios de muestreo de calidad de agua. (Fuente: MARN)

No	Sitio de muestreo	Ubicación	Coordenada Norte	Coordenada Este
1	D -01 - GRAND	Rio Grande de Sonsonate, costado oriente de Beneficio Tres Rfos	13.77616	-89.72775
2	D -02 - GRAND	Rio Grande de Sonsonate, aguas arriba del puente calle a Nahuizalco, Sonzacate	13.7405	-89.71838
3	D -03 - GRAND	Rio Grande de Sonsonate, carretera a Acajutla a altura de Hda. Santa Clara	13.67191	-89.75622
4	D -04 - GRAND	Rio Grande de Sonsonate, 200 mts aguas debajo de estación de ferrocarril antigua	13.59983	-89.82817

Tabla 9. Resultados de los parámetros de calidad de agua, año 2011) (Fuente: MARN)

ID Sitio muestreo/parámetros	pH	Color aparente	Conductividad eléctrica	Oxígeno disuelto	Turbidez	Boro	Cloruros	Fenoles	Nitratos
Unidades	(u pH)	(unidades Pt - Co)	(uS/cm)	(mg / l)	(FAU)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Riego	6.5 - 8.4		0 - 750			0 - 2.0	≤ 195		
Agua potable	6.5 - 9.2	0 - 150		4 - 6.5	0 - 250		0 - 250	≤ 3.5	≤ 45
Actividades recreativas				≥ 7	≤ 10				
D-01-GRAND	7.24	238.5	281	4.43	36.3	ND	6.55	2	17.8
D-02-GRAND	7.31	76.5	282	5.17	19.9	ND	7.48	0.7	18.7
D-03-GRAND	7.03	10.5	317	3.81	0.2	ND	6.55	2.5	19.8
D-04-GRAND	7.18	13	339	4.2	5.93	ND	7.95	2.7	18.65

Tabla 10. Resultados de los parámetros de calidad de agua para calcular el Índice de Calidad de Agua, año 2011(Fuente: MARN)

Sitio	pH	Oxígeno disuelto (mg/l)	Porcentaje saturación OD (%)	Turbidez (FAU)	Fosfatos (mg/l)	Nitratos (mtg/l)
D 01 GRAND	7.24	4.43	55.74	36.3	0.53	17.80
D 02 GRAND	7.31	5.17	67.41	19.9	0.58	18.70
D 03 GRAND	7.03	3.81	49.68	0.20	1.19	19.80
D 04 GRAND	7.18	4.20	58.63	5.93	0.88	18.65

Tabla 11. Valoración de Calidad de Agua para la Región Hidrográfica del Río Grande de Sonsonate, año 2011. (Fuente: MARN)

Sitio	Ubicación	ICA	Calificación	Apta para potabilizar	Apta para riego	Apta para contacto humano
D 01 GRAND	Río Grande de Sonsonate, costado oriente de Beneficio Tres Ríos	48	Mala	No	No	No
D 02 GRAND	Río Grande de Sonsonate, aguas arriba del puente calle a Nahuizalco, Sonzacate	56	Regular	No	No	No
D 03 GRAND	Río Grande de Sonsonate, carretera a Acajutla a la altura de Hda. Santa Clara	45	Mala	No	No	No
D 04 GRAND	Río Grande de Sonsonate, 200 mts aguas debajo de estación de ferrocarril antigua.	49	Mala	No	No	No

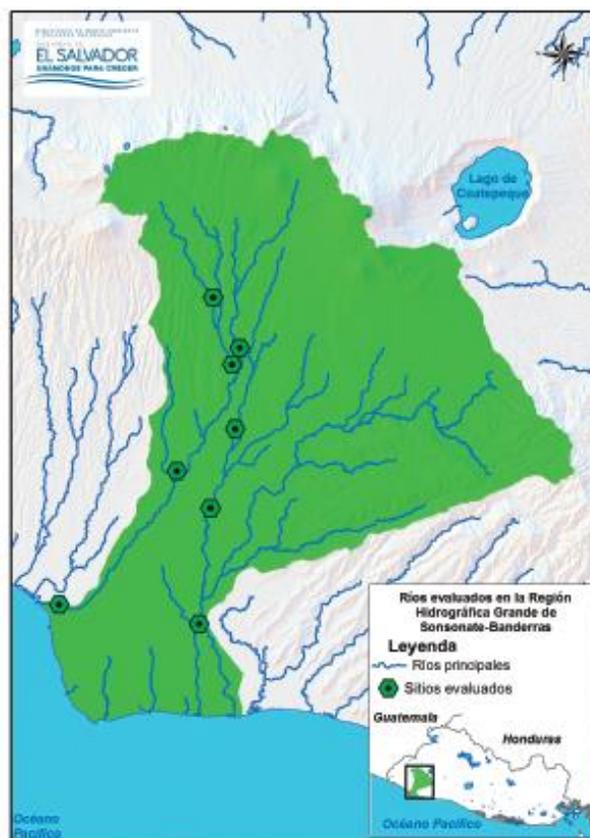


Figura 14. Aprovechamiento del agua de los sitios evaluados en los ríos de la región hidrográfica del río Grande de Sonsonate. (Fuente: MARN)

3.5. Aprovechamientos.

El agua es uno de los recursos naturales más apreciados por el hombre. Debido a la multitud de actividades productivas que nos ofrece, los ríos son un generador de riqueza y, a la vez, un elemento básico para la vida del ser humano, de las plantas y de los animales.

A lo largo de los siglos se han ido creando, en torno al río, una serie de infraestructuras para conseguir implantar regadíos y desarrollar mejoras, para dosificar mejor el caudal según las necesidades de aprovechamiento de los mismos (MARN España, 2008), a continuación se mencionan los aprovechamientos que actualmente se hacen del Río Sensunapán, se comentará la parte de aprovechamiento hidroeléctrico.

- a) Aprovechamiento agrológicos
- b) Aprovechamiento hidroeléctrico
- c) Aprovechamiento pesqueros (pesca artesanal)
- d) Aprovechamiento de materiales pétreos del cauce del río Sensunapán
- e) Aprovechamiento agroindustrial
- f) Aprovechamiento turístico y recreativo

3.5.1. Aprovechamiento hidroeléctrico.

Las pendientes de la cuenca del Sensunapán la hacen propicia para el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas, existiendo seis proyectos hidroeléctricos en funcionamiento, de los cuales solamente dos cuentan con permiso ambiental, además hay otros dos proyectos sin construir que están tramitando sus permisos ambientales y un proyecto más que cuenta con permiso ambiental de ubicación y construcción.

La mayoría de las centrales funcionan a través de diques de derivación de diferentes alturas que retienen el agua para conducirla por túneles o canaletas hacia las casas de máquinas; la mayoría de estas retenciones solo dejan pasar el agua por rebalse en época de lluvia, impidiendo la existencia de un caudal ambiental en el río (Tabla 12)

Tabla 12. Nombre y características de las centrales hidroeléctricas existentes en la cuenca del río Sensunapán o Grande de Sonsonate. (Fuente: CNE, energías renovables - hidráulica)

Nombre Central	Ubicación	Propietario	Recurso Concesionado	Capacidad Instalada (kW)	Generación Promedio Anual (MWh)	Zonas beneficiadas con la generación de energía	Descripción técnica del proyecto
La Calera	Juayúa, Sonsonate	Sociedad De Matheu y CIA, S.A de C.V	Vertientes de Santa Lucia y Cataratas de la Calera	1,448.00	4,500.00	Juayúa, Nahuizalco	Captaciones en ladera 2 Turbinas tipo Francis eje horizontal Presa tipo a Filo de Agua 1
Papaloate	Juayúa, Nahuizalco, Sonsonate	Sociedad Hidroeléctrica Papaloate S.A de C.V	Rio Papaloate	2,000.00	9,900.00	Juayúa, Nahuizalco	Turbina tipo Pelton eje horizontal 2 Presas tipo a Filo de Agua 3
Nahuizalco I	Nahuizalco, Sonsonate	Sociedad Sensunapán S.A de C.V	Ríos Papaloate, Sensunapán, Las Monjas	2,797.50	18,000.00	Nahuizalco	Turbinas Tipo Francis eje horizontal de 971 kW c/u Presa tipo a Filo de Agua 2
Cucumacayán	Nahuizalco, Sonsonate	Compañía Eléctrica Cucumacayán, S.A de C.V.	Río Sensunapán o Grande de Sonsonate	2,256.00	11,100.00	Nahuizalco	Turbinas Tipo Francis eje vertical Presa tipo a Filo de Agua 2
Bululú	Sonzacate, Sonsonate	Compañía Eléctrica Cucumacayán, S.A de C.V.	Río Sensunapán o Grande de Sonsonate	680	2,200.00	Sonsonate	Turbinas Tipo Francis eje horizontal Presa tipo a Filo de Agua 1
Sonsonate	Sonsonate	Compañía Eléctrica Cucumacayán, S.A de C.V.	Río Sensunapán o Grande de Sonsonate	150	900	Sonsonate	turbina tipo Cámara Abierta, eje vertical

Tabla 13. Situación de las centrales existentes o en proyecto en el río Sensunapán, a efectos de sus respectivas autorizaciones ambientales. (Fuente: MARN, 2016)

Número	Operatividad	Situación Administrativa	Nombre	Coordenadas
6	En Operación	2 con permiso ambiental	Nahuizalco I o	13°47'39.69" N
			Sensunapán I	89°43'49.05" O
			Papaloate	13°49'13.91" N 89°44'43.51" O
		3 formulario	Sonsonate	13°43'53.19" N 89°43'4.84" O
			Bululú	13°43'53.19" N 89°43'4.84" O
			Cucumacayán	13°45'52.11" N 89°43'24.61" O
3	Nuevos proyectos	1 sin registros en el MARN	La Calera	13°50'11.57" N 89°43'59.74" O
			1 con permiso ambiental actualmente en construcción	Juayúa
		2 en evaluación ambiental	Nahuizalco II	13°45'52.11" N 89°43'24.61" O
			San Francisco	13°83'86.81" N 89°72'77.14" O

Por lo que respecta al nivel de avance de la evaluación y autorización ambiental de estas centrales y de las que se encuentran en fase de proyecto, la tabla 13 y la figura 15 resumen los datos existentes hasta la fecha.

Con el fin de estimar los caudales medios mensuales en cada uno de los sitios de presa o toma de agua de las centrales hidroeléctricas, para compararlos con los caudales derivados por cada una de las mismas para la generación de energía, se tomaron como base los registros existentes de la estación Sensunapán, los aforos en la estación Santa Emilia, así como las metodologías para estimación de caudales medios, tanto la de regionalización, estudio territorial de Erazo A, (2004), como la de precipitación-escorrentía, también de Erazo (2004), y relación de áreas.

Adicionalmente se cuenta con aforos en los sitios de interés para los meses de noviembre y diciembre del año 2010 y abril y junio de 2011. Estos últimos datos, aunque son importantes, no permiten la validación de los resultados obtenidos con las metodologías de generación de caudales medios mensuales, dado que el año 2010 fue un año muy lluvioso con un registro anual de lluvia de 2549 mm, lo que representa un 37 % por encima del promedio anual de 1867 mm, por lo que la escorrentía generada tanto al final del año 2010 como en el 2011 responde a esta cantidad de lluvia y por lo tanto son valores superiores a los promedio calculados.

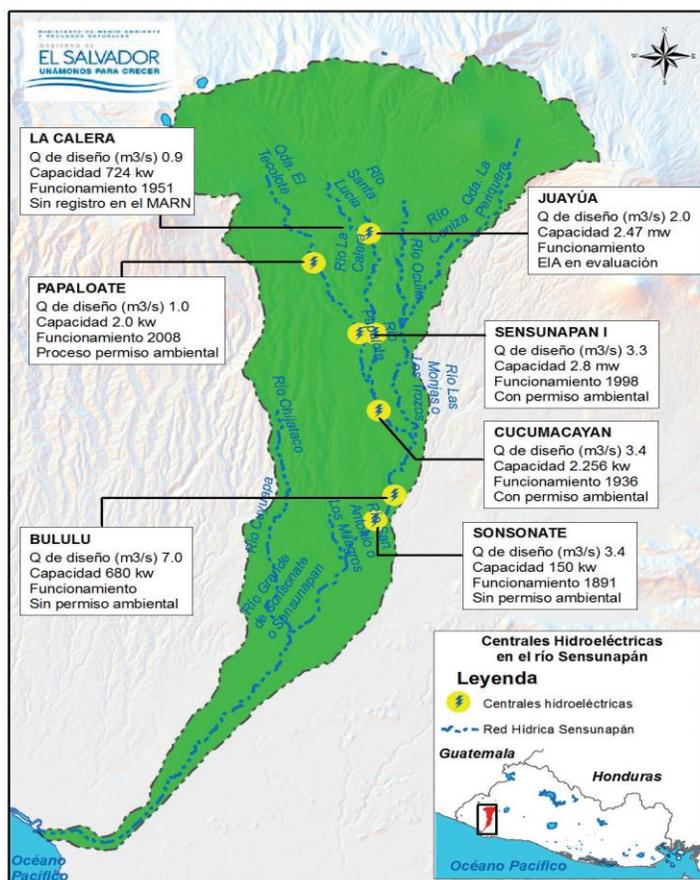


Figura 15. Ubicación y características de las centrales hidroeléctricas construidas en el río Sensunapán. (Fuente: MARN)

Las metodologías mencionadas fueron aplicadas inicialmente en la estación Sensunapán con el fin de validar los resultados obtenidos y, en caso de diferencia, obtener un factor de corrección, el cual, posteriormente, fue aplicado al resultado promedio en los otros sitios de interés, para obtener los resultados finales en cada uno de los sitios de presa o toma de agua de las centrales hidroeléctricas, estos se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Caudales medios estimados (m³/s) en sitios de interés en la cuenca del río Sensunapán. (Fuente: Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos, MARN 2016)

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	enero	febrero	marzo	abril	Qm Anual	Área (km ²)
La Calera Sitio de presa (1)	0.45	0.78	0.68	0.81	1.12	0.87	0.36	0.16	0.14	0.12	0.13	0.2	0.47	19
Papaloate Sitio de presa (2)	0.58	1.01	0.88	1.05	1.45	1.13	0.47	0.21	0.18	0.16	0.17	0.26	0.61	24.61
Nahuizalco I Sitio de Presa en Papaloate (3)	0.71	1.23	1.07	1.27	1.77	1.37	0.57	0.26	0.22	0.19	0.2	0.32	0.74	29.94

Nahuizalco I															
Sitio de Presa en Sensunapán (4)	0.94	1.64	1.42	1.69	2.34	1.82	0.76	0.34	0.29	0.25	0.27	0.42	0.99	39.69	
3+4	1.65	2.87	2.48	2.96	4.1	3.19	1.33	0.6	0.51	0.45	0.47	0.74	1.73	69.63	
Juayúa Sitio de Presa (5)	0.83	1.45	1.25	1.49	2.07	1.61	0.67	0.3	0.26	0.23	0.24	0.37	0.87	35.13	
Cucumacayán															
Sitio de Presa (6)	1.83	3.18	2.75	3.28	4.55	3.53	1.48	0.67	0.57	0.49	0.52	0.82	1.92	77.15	
Nahuizalco II															
Sitio de Presa (7)	1.85	3.22	2.78	3.32	4.6	3.57	1.49	0.68	0.57	0.5	0.53	0.83	1.94	78.06	
Bululú Sitio de Presa (8)	3.24	5.64	4.88	5.82	8.06	6.26	2.62	1.19	1.01	0.88	0.92	1.45	3.4	136.75	
Sonsonate Sitio de Presa (9)	3.44	6	5.19	6.19	8.57	6.66	2.78	1.26	1.07	0.93	0.98	1.54	3.62	145.46	

Al comparar los caudales estimados a nivel mensual en cada uno de los sitios con los caudales de diseño que utiliza cada una de las centrales para la generación hidroeléctrica, se puede observar que en los meses de la época seca, de noviembre a abril, e incluso en mayo, en todos los sitios el caudal de diseño es superior al estimado, lo que significa que para esos meses los tramos entre el sitio de presa o toma de agua y la casa de máquinas quedan secos, ya que toda el agua es derivada hacia la central hidroeléctrica.

La central hidroeléctrica Nahuizalco II aunque aún se encuentra sin construir, se consideró en los cálculos para observar el comportamiento de los caudales en el sitio de presa.

Se ha dispuesto de unos caudales anuales contenidos en el fichero “caudales generados en sitios de presas” facilitado por el Observatorio Ambiental (inventario y caracterización SAT informe de El Salvador, sf). En dicho fichero para cada punto de captación de las centrales se da una distribución de caudales medios mensuales correspondientes a un promedio multianual (los resultados finales se obtuvieron a partir de tres metodologías:

Regionalización de caudales medios, relación precipitación – escorrentía y relación de áreas; de las cuales esta última fue con base en el periodo 1959-1982, de acuerdo a los registros de la única estación existente en la cuenca; las otras dos metodologías por ser regionalizaciones comprenden periodos más amplios, de acuerdo a los periodos de registro de las estaciones a partir de las cuales fueron calculadas (entre 1960 a 2004). Estos caudales deben ser una estimación del caudal circulante en los sitios de presa en régimen natural, es decir, del caudal que circularía por el cauce en los sitios de presa en condiciones naturales (Figura 16).

Según la información que se ha encontrado, la mayor parte de las turbinas son Francis, que pueden funcionar en un rango de caudal entre el 40 % y el 105 % del caudal de diseño

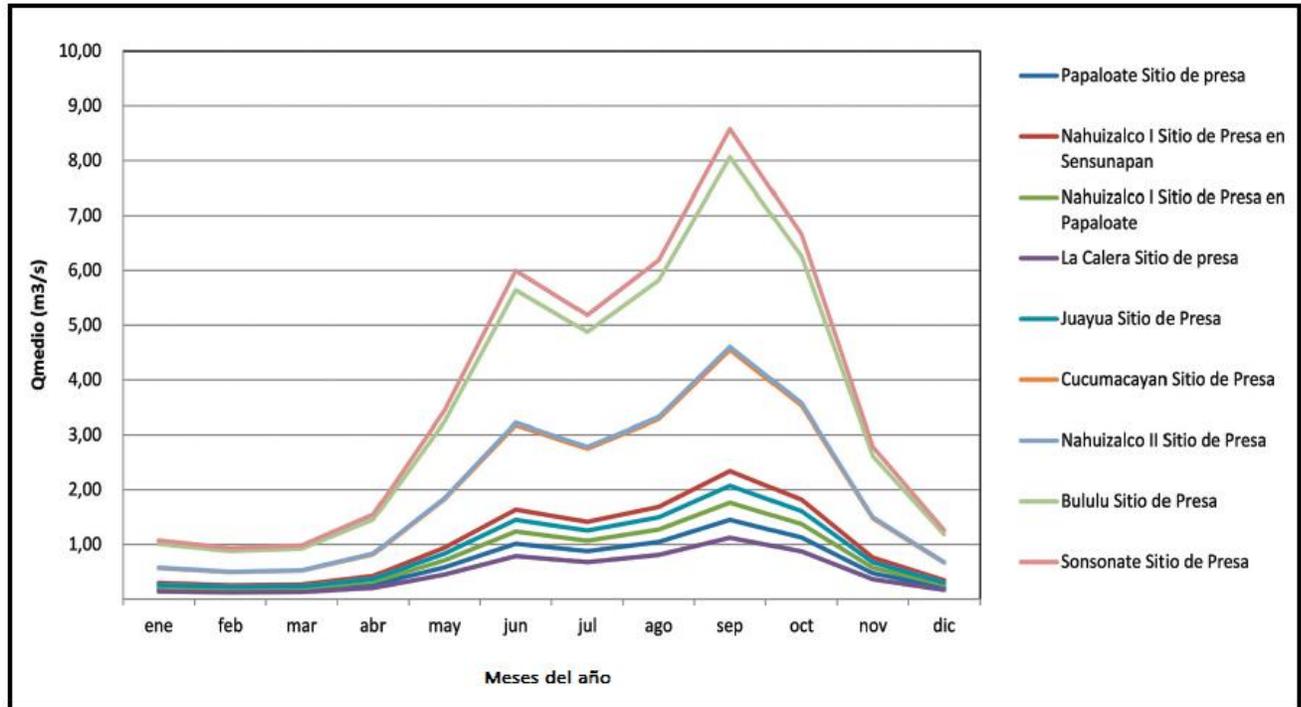
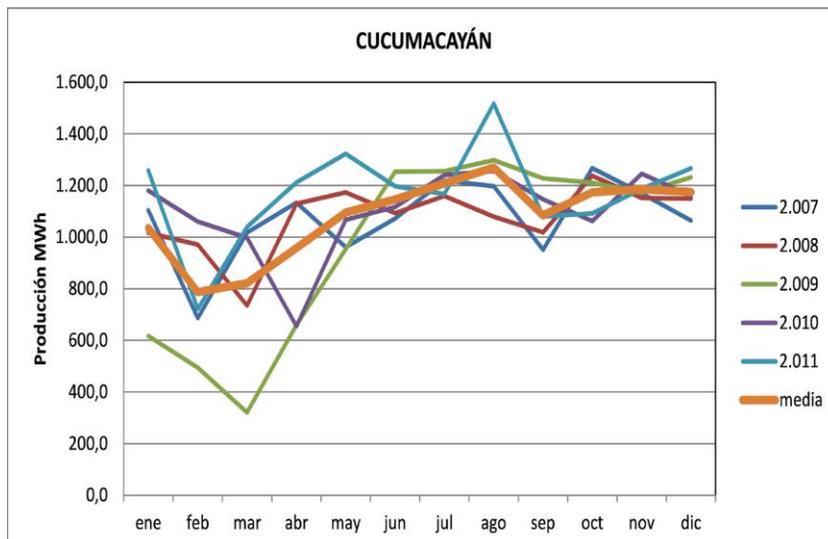
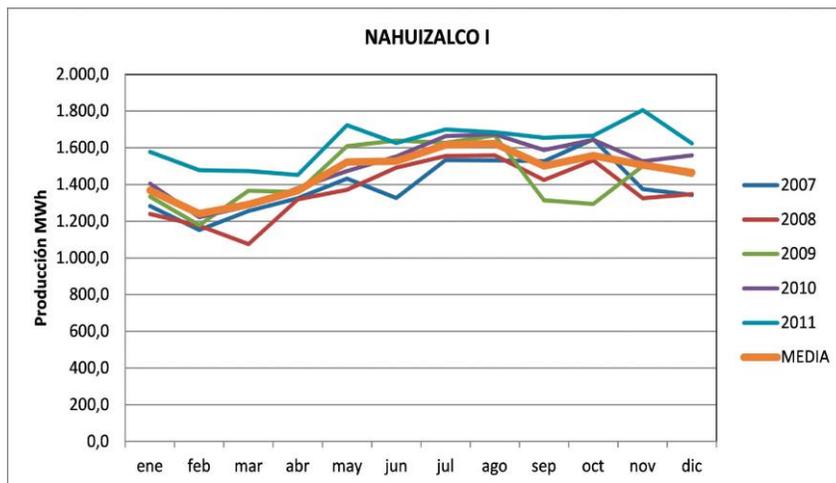
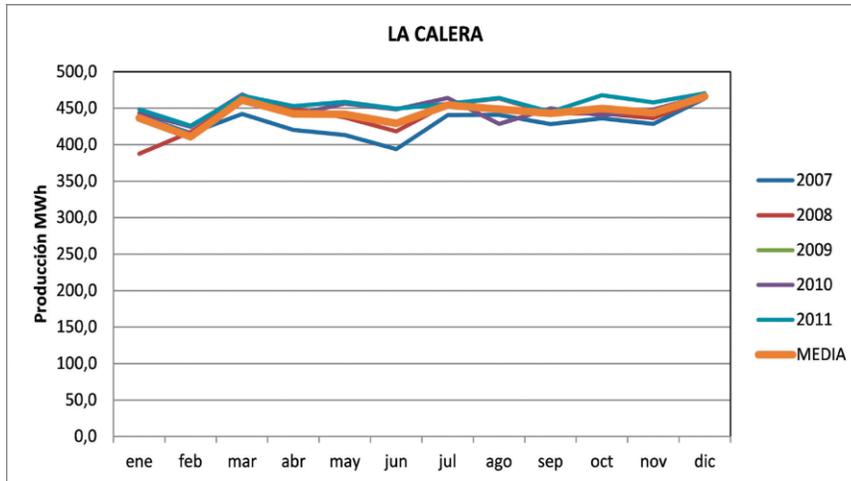


Figura 16. Distribución de caudales medios mensuales en los puntos de toma de las centrales. (SNET, 2005)

Sin embargo, para esta tipología, el rendimiento es muy sensible a la variación del caudal, de manera que para caudales inferiores al 60 % del nominal, el rendimiento de la turbina es inferior al 80 %. Así, centrales como Cucumacayán y Bululú estarían mayoritariamente fuera del rango de funcionamiento, al menos durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre, y Nahuizalco I estaría en el límite con rendimientos muy bajos.

Por otra parte, como se ha indicado, se ha analizado la información sobre energía mensual producida por cada central contenida en el boletín de estadísticas eléctricas publicado por la SIGET desde 2007 a 2011. Según esta información, las centrales funcionan a lo largo de todo el año y en varios casos con un régimen relativamente uniforme, según puede comprobarse en la Figura 17.



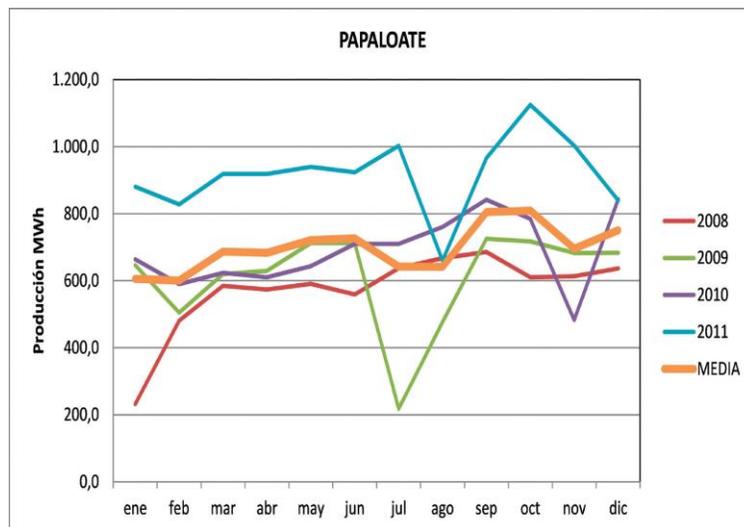
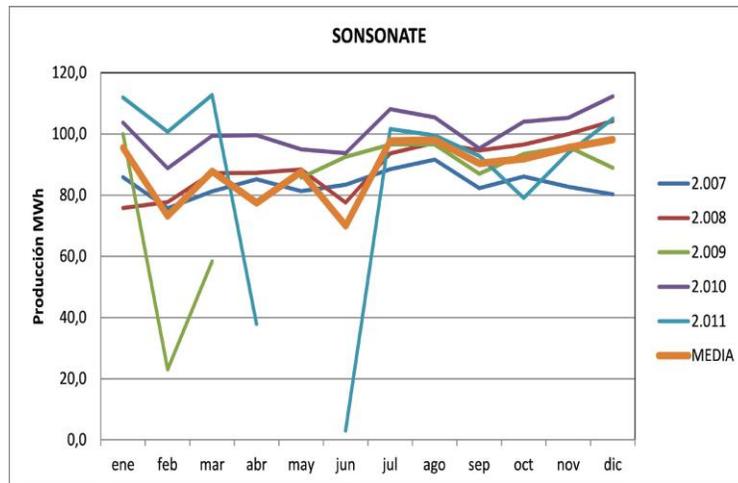
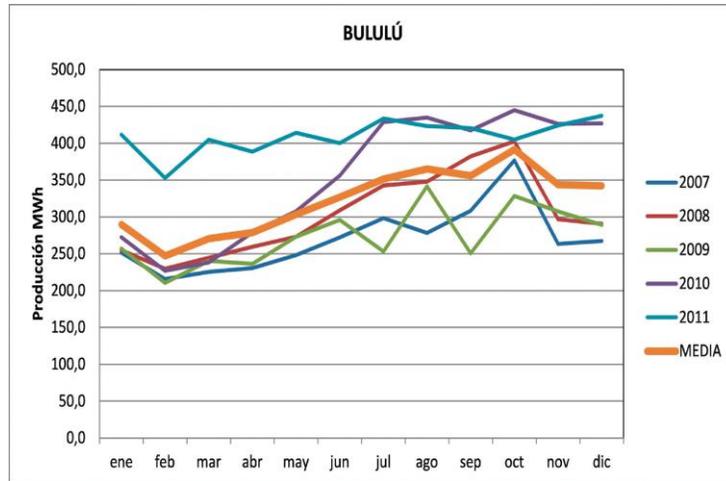


Figura 17. Producción de las centrales hidroeléctricas existentes en la cuenca del río Grande de Sensunapán (SIGET, 2007)

Puede apreciarse en las figuras anteriores que la energía producida varía mucho menos que el caudal en régimen natural.

Por tanto, los datos disponibles parecen indicar que las centrales funcionan todo el año, de manera relativamente uniforme, si bien en algunos casos (Cucumacayán y Bululú) aparecen diferencias, se debe al número de horas de funcionamiento mensual entre la estación seca y la húmeda.

La estimación de caudales medios que se dispone en los puntos de toma puede ser útil para un análisis de recursos en términos medios; sin embargo, para el presente análisis del funcionamiento de las centrales y posibilidades de actuación, se requiere una escala temporal más detallada y sistemática que permita conocer el comportamiento del río y las centrales a lo largo de un período bastante amplio y que contemple las dos épocas, lluviosa y seca.

La estimación de recursos en régimen natural, con base a hidrogramas asociados a una estimación del año medio, indica claramente una irregularidad de la aportación con máximos notables en la época húmeda y caudales bajos durante el periodo de estiaje.

Dependiendo de las características de la infraestructura hidráulica instalada de nuestro proyecto bajo estudio, la alteración hidrológica podrá afectar a diferentes componentes del régimen de caudales. En aquellos casos donde una presa presente un gran volumen de almacenamiento, frente a los aportes del río, la modificación podrá afectar a: los caudales mínimos de estiaje, los caudales de la época de lluvias y al régimen de avenidas. Por el contrario se trata solamente de una presa derivadora, se verán únicamente afectados los caudales mínimos, pero no las avenidas (Sergio. S. 2011), lo que nos obliga a estimar con un grado más certero, el caudal de equipamiento y el caudal ecológico asociado a este tipo de proyectos.

3.6. Riesgos ambientales. (Proyecto USAID – Manejo de cuencas hidrográficas. (febrero.2009).

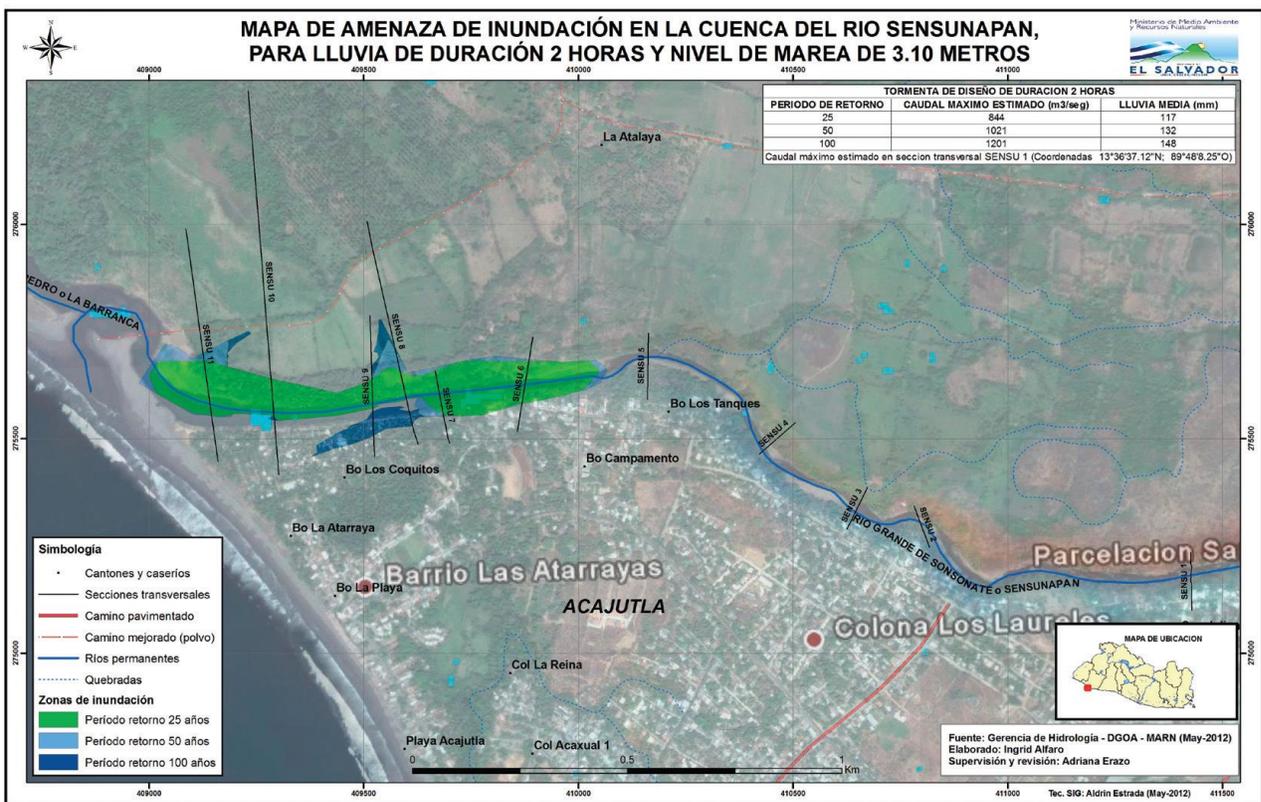
3.6.1. Riesgo de inundaciones.

Entorno Fisiográfico: El río Sensunapán discurre en su cuenca media y baja a través de una planicie costera, con pendientes muy bajas, esta característica es más marcada en la última sección.

Características del cauce: el material de las paredes y lecho del río son materiales muy estables (lavas), sus características geológicas reducen la susceptibilidad a las erosiones y al cambio continuo de la forma del mismo, en la parte alta y media de la cuenca; mientras que en la parte baja debido a la topografía (nivel del mar) y al material geológico (suelo franco limosos), presenta una alta susceptibilidad a procesos de inundación, debido a la ruptura de la borda en la margen izquierda de este.

Desbordamientos: el río Sensunapán realiza un recorrido por la ciudad de Sonsonate, sin presentar problemas en estas secciones del cauce, pero si en la parte baja donde se tienen registrados datos de inundaciones en los últimos 10 años, donde se ha construido una borda para evitar que los daños causados por estos fenómenos sean mayores en la margen izquierda; mientras que en la margen derecha del cauce por presentar paredes más bajas, el agua es drenada a la llanura de esta margen, donde únicamente se encuentra vegetación natural o cultivos (Figura 18).

Otro sitio donde se presenta desbordamiento es en la quebrada Julupe, afluente del río Sensunapán, el cual se une al cauce principal de este en el municipio de Sonsonate, en la parte urbana de este mismo. Debido a esta ubicación las personas han habitado las riberas y reducido la capacidad de conducción o la capacidad de expansión en sus márgenes durante las crecidas, por lo que los niveles en la mayoría de los eventos de lluvia alcanzados entran en las viviendas causando daños económicos a sus habitantes, además del daño de las estructuras de paso. (MARN. 2016)



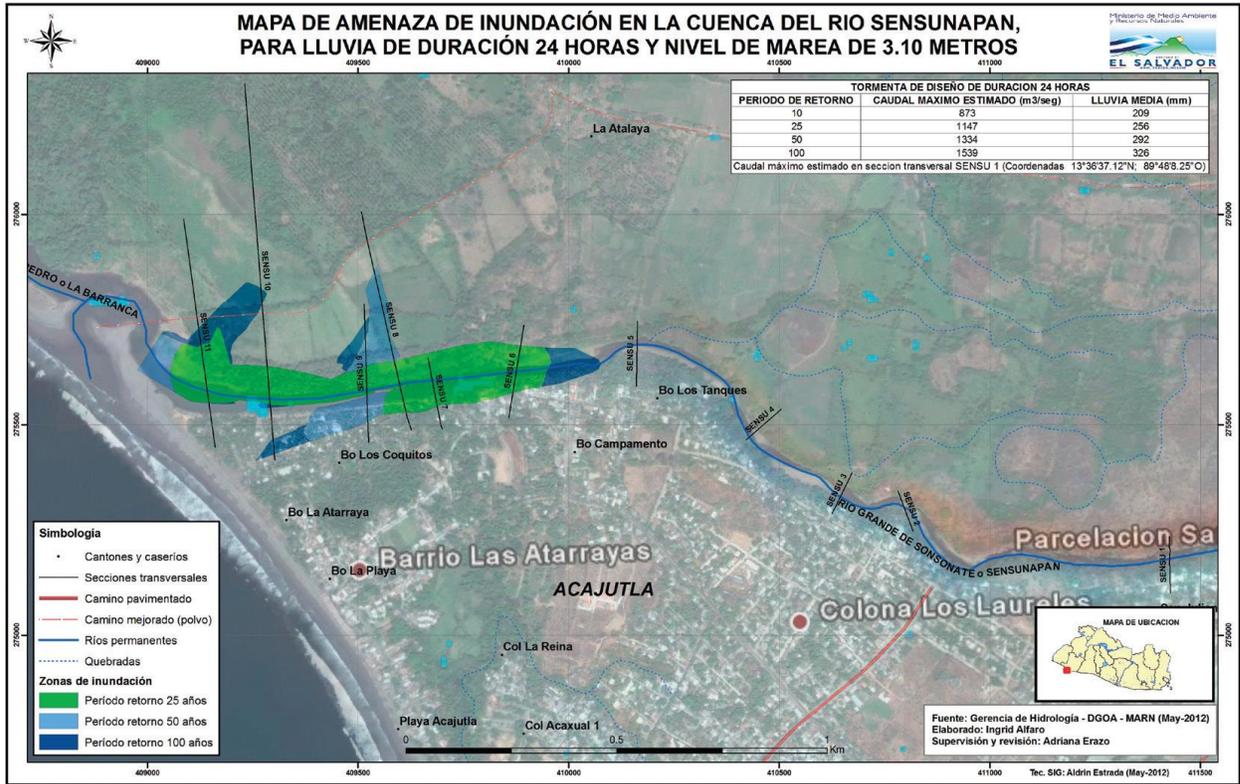


Figura 18. Mapas de riesgo de inundación en la cuenca del río Sensunapán para diferentes duraciones de lluvias y periodos de retorno (Fuente: SNET)

3.6.2. Riesgos por contaminación ambiental.

- Producción y exportación de helechos. Finca Arizona, cantón San José La Majada, Juayúa.
- Planta de abono orgánico. Finca San Francisco, cantón La Unión y cantón La Lechera, Juayúa.
- Proyecto recreativo “Los Cipreses” o “Portal de las orquídeas”. Km. 84, carretera Salcoatitán- Juayúa.
- Riego agrícola deficiente (30 % de eficiencia).
- El uso del recurso agua para fines de riego agrícola se realiza con baja eficiencia (30 %).

3.7. El marco normativo.

A continuación se detalla la normativa más relevante y autoridades competentes, relacionadas con el manejo de los recursos hídricos de la cuenca del río Sensunapán (Tabla 15).

Tabla 15. . Instrumentos normativos para el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del río Sensunapán.

Instrumento	Temas y disposiciones	Entidad
<i>Código Civil</i>	Ríos, lagos y lagunas - arts. 576, 579 • Modificación de cauce - art. 635	Alcaldías Municipales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<i>Ley del Medio Ambiente</i>	• Criterios de supervisión del recurso hídrico –art. 49 • Gestión y uso de agua de ecosistemas acuáticos – art. 70 • Manejo de suelos y ecosistemas terrestres – art. 75 • Prevención y control de la contaminación – art. 43 • Sistema de Evaluación Ambiental - art. 21	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<i>Código Municipal</i>	• Regulación de actividades turísticas - art. 4	Alcaldías Municipales
<i>Ley Forestal</i>	• Aprovechamiento Forestal - art. 8 • Plantaciones de café, cultivos agrícolas permanentes - art. 17. • Áreas de Uso Restringido - art. 23	Ministerio de Agricultura y Ganadería
<i>Código de Salud</i>	• Saneamiento Ambiental - art. 56 • Control de la contaminación en el curso de agua -art. 67	Ministerio de Salud
<i>Ley de Riego y Avenamiento</i>	• Los recursos hidráulicos son bienes nacionales - art. 3 • Prioridad de uso - art. 4 • Agotamiento de recursos hidráulicos – art. 5 • Declaratoria de veda – art. 23	Ministerio de Agricultura y Ganadería
<i>Ley de Ordenamiento y Desarrollo Territorial</i>	• Contenidos del Plan Nacional – art. 26 • Planes Departamentales – art. 31 • Planes Municipales - art. 34	Consejo Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones
<i>Ley General de Electricidad</i>	• Concesiones de recursos hidráulicos - art. 1	Ministerio de Turismo
<i>Ley de Turismo</i>	• Protección del patrimonio natural – art. 14	
<i>Ordenanza Municipal sobre Derechos de las Comunidades Indígenas Asentadas en el Municipio de Nahuizalco</i>	• Uso y manejo de recursos naturales acorde a costumbres, tradiciones y creencias de las comunidades indígenas – art. 30	Alcaldía Municipal de Nahuizalco
<i>Ordenanza Municipal para el Manejo Adecuado y Disposición Final de las Aguas residuales de tipo ordinario de la ciudad de Juayúa, Departamento de Sonsonate</i>	• Prohibición para descargar ciertos vertidos – art. 20 • Vertido de lodos – art. 23 • Vertido de grasas – art. 24 • Otras prohibiciones – art. 25 • Infracciones - art. 30	Alcaldía Municipal de Juayúa

La aplicación de métodos hidrológicos para el análisis de los caudales ecológicos en el río parte exclusivamente del análisis de la serie de aforos existentes en el sistema fluvial. En el caso de la cuenca del río Sensunapán, la única serie de interés con la que se contaba, por su longitud y calidad, era la correspondiente a la estación hidrométrica de Acajutla, próxima a la desembocadura del río en el océano Pacífico.

Esta estación registró datos diarios de caudales desde junio de 1959 hasta abril de 1982 (17 años completos), periodo en el que existía aún, de acuerdo a las informaciones provenientes del MARN, un aprovechamiento reducido de las aportaciones naturales del río Sensunapán. Por ello, puede considerarse una serie hidrológica poco alterada por regulación o abstracción de caudales, válida para la evaluación de los requerimientos ambientales del río.

Sin embargo, la utilización de la serie mencionada comprende algunos trabajos previos a su incorporación a los métodos de cálculo:

a) La serie cuenta con huecos de diferente longitud (desde unos pocos días hasta varios meses), por lo que resulta preciso proceder a completar aquellas lagunas que, desde el punto de vista de la estadística hidrológica, puedan ser rellenadas, para ello se ha hecho uso estratégicamente del programa estadístico SPSS V.17 para determinar:

- Media de la serie. Sustituye los valores perdidos con la media de la serie completa.
- Media de puntos adyacentes. Sustituye los valores perdidos por la media de los valores válidos circundantes. La amplitud de los puntos adyacentes es el número de valores válidos por encima y por debajo del valor perdido, utilizados para calcular la media.
- Mediana de puntos adyacentes. Sustituye los valores perdidos por la mediana de los valores válidos circundantes. La amplitud de los puntos adyacentes es el número de valores válidos por encima y por debajo del valor perdido, utilizados para calcular la mediana.
- Interpolación lineal. Sustituye los valores perdidos utilizando una interpolación lineal. Se utilizan para la interpolación, el último valor válido antes del valor perdido y el primer valor válido después del valor perdido. Si el primer o el último caso de la serie tiene un valor perdido, el valor perdido no se sustituye.
- Tendencia lineal en el punto. Reemplaza los valores perdidos de la serie por la tendencia lineal en ese punto. Se hace una regresión de la serie existente sobre una variable índice escalada de “1” a “n”. Los valores perdidos se sustituyen por sus valores pronosticados.

La alternativa más conveniente es la interpolación lineal, por ser la que se adecua más a la longitud de los huecos y a las necesidades del producto final. En todo caso, los huecos completados fueron aquellos de escasa magnitud, siempre por debajo de 5 días consecutivos. Una vez completa, se procedió a la caracterización de la serie de caudales, con objeto de conocer con detalle sus características interanuales (tabla 16 –tabla 19, figura 19 y figura 20).

Tabla 16. Caracterización de la variabilidad interanual (fuente: MARN, Metodología para el cálculo de caudal ecológico)

Datos			
Año	Aportación hm ³	Año	Aportación hm ³
1959-60	144.749	1971-72	178.850
1960-61	338.613	1972-73	227.336
1963-64	191.631	1975-76	155.538
1964-65	183.241	1976-77	147.534
1965-66	183.780	1977-78	126.235
1966-67	106.947	1978-79	169.096
1967-68	91.148	1979-80	162.719
1969-70	190.248	1980-81	171.539
1970-71	212.540b	-	-

Caracterización de la variabilidad interanual	
Año húmedo si aportación anual (hm ³) ≥	190,940
Año medio si aportación anual (hm ³) <	190,940 y > 146,141
Año seco si aportación anual (hm ³) ≤	146,141

Tipos de año					
Húmedos		Medios		Secos	
Año	Aportación	Año	Aportación	Año	Aportación
1960-61	338,613	1964-65	183,241	1959-60	144,749
1963-64	191,631	1965-66	183,780	1966-67	106,947
1970-71	212,54	1969-70	190,248	1967-68	91,148
1972-73	227,336	1971-72	178,850	1977-78	126,235
		1975-76	155,538		
		1976-77	147,534		
		1978-79	169,096		
		1979-80	162,719		
		1980-81	171,539		

Tabla 17. Aportaciones mensuales y caudales diarios mensuales en la estación de Acajutla, por tipo de año
(Húmedo, medio o seco) (Fuente: MARN, 2016)

Tipo de año	Húmedo	Medio	Seco	Húmedo	Medio	Seco
Mes	Aportaciones mensuales (hm ³)			Caudales diarios mensuales (m ³ /s)		
Octubre	39.374	24.131	16.081	14.701	9.009	6.004
Noviembre	18.360	10.449	4.669	7.083	4.031	1.801
Diciembre	8.406	4.018	2.749	3.139	1.5	1.026
Enero	6.863	3.845	2.376	2.562	1.435	0.887
Febrero	5.940	3.223	1.79	2.455	1.332	0.74
Marzo	6.079	3.426	2.254	2.27	1.279	0.842
Abril	8.340	5.000	2.984	3.217	1.929	1.151
Mayo	15.166	11.655	8.14	5.662	4.351	3.039
Junio	35.790	18.738	17.038	13.808	7.229	6.573
Julio	29.798	20.682	12.334	11.125	7.722	4.605
Agosto	42.385	23.058	14.61	15.825	8.609	5.455
Septiembre	47.211	24.932	18.723	18.214	9.619	7.223

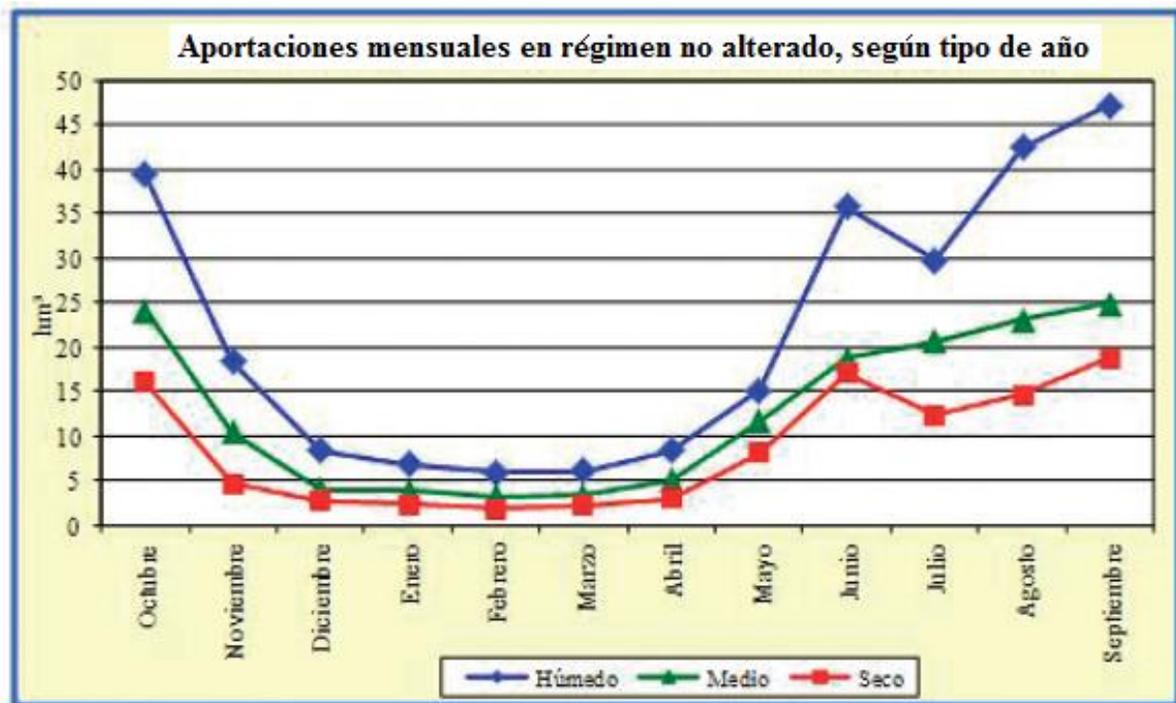


Figura 19. Aportaciones mensuales en régimen no alterado en la estación de Acajutla, por tipo de año (húmedo, medio o seco). (MARN.2016)

Tabla 18. Caracterización de la serie de caudales registrados en la estación de Acajutla, a partir de su discretización en valores habituales, extremos-avenidas y extremos-sequías, para cada uno de los tipos de año definidos con anterioridad. (Fuente: Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos MARN. 2016)

Componente del régimen no alterado		Aspecto Descripción	Parámetro		
			Valor (hm ³ ó m ³ /s)		
Valores habituales	Aportaciones anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales	Año húmedo	242.53
				Año medio	171.39
				Año seco	117.27
				Año pond.	175.4
		Variabilidad	Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año	Año húmedo	54.96
				Año medio	34.89
				Año seco	18.84
				Año pond.	35.84
	Estacionalidad	Mes de máxima y mínima aportación	Año húmedo	sep-feb	
			Año medio	sep-feb	
Año seco			sep-feb		
Caudales diarios	Variabilidad	Diferencia entre los caudales medios diarios correspondientes a los percentiles de excedencia el 10% y 90%	Q 10%	10.66	
			Q 90%	1.34	
Valores extremos	Caudales máximos (avenidas)	Magnitud y frecuencia	Media de los máximos caudales diarios anuales	Qc	67.95
			Caudal generador del lecho; Período de retorno	QGL; T	83.63
			Caudal de conectividad; Período de retorno	QCONEC; T	121.06
			Caudal de la avenida habitual (percentil de excedencia del 5%)	Q 5%	14.86
		Variabilidad	Coefficiente de variación de máximos caudales diarios anuales	CV(Qc)	0.88
			Coefficiente de variación de la serie de avenidas habituales	CV (Q 5%)	0.43
		Estacionalidad	Número medio de días al mes con caudal medio diario \geq Q5%	Ver tabla al pie	
		Duración	Máximo n° de días consecutivos con caudal medio diario \geq Q5%		5
Valores extremos		Magnitud y frecuencia	Media de los mínimos caudales diarios anuales	Qs	0.91

	Caudales mínimos (sequías)		Caudal de la sequía habitual (percentil de excedencia del 95%)	Q 95%	1.21	
		Variabilidad		Coefficiente de variación de mínimos caudales diarios anuales	CV(Qs)	0.67
				Coefficiente de variación de la serie de sequías habituales	CV (Q 95%)	0.5
		Estacionalidad		Número medio de días al mes con caudal medio diario $\leq Q_{95\%}$	Ver tabla al pie	
		Duración		Máximo n° de días consecutivos con caudal medio diario $\leq Q_{95\%}$		24.47
				Número medio de días al mes con caudal medio diario nulo	Ver tabla y gráfico al pie	

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
No. medio días con $Q \geq Q_{5\%}$	3.9	0.4	0	0	0	0	0	0.3	2.4	1.4	3.6	4.5
No. medio días con $Q \leq Q_{95\%}$	0	1.7	8.8	10.5	12.6	13.8	8.8	0.6	0	0	0	0
No. medio días con Q nulo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 19. Principales percentiles de excedencia de la estación de Acajutla. (Fuente: MARN, 2016)

Número de días en los que el caudal es excedido	Percentil de excedencia	Caudal (m ³ /s) - régimen no alterado
18	5	14.95
37	10	10.59
55	15	8.84
73	20	7.81
91	25	7.1
110	30	6.47
128	35	5.93
146	40	5.41
164	45	4.79
183	50	4.16
201	55	3.21
219	60	2.52
237	65	2.07
256	70	1.81
274	75	1.65
292	80	1.54
310	85	1.44
329	90	1.34
347	95	1.21
365	100	0.93

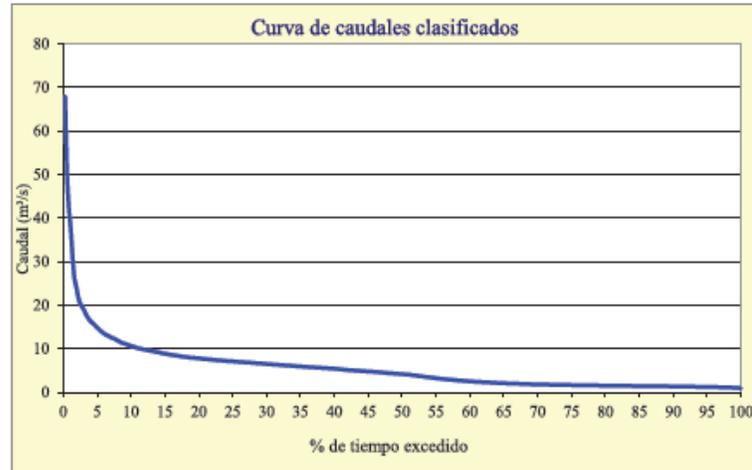


Figura 20. Curva de caudales clasificados en la serie de aforos de la estación de Acajutla.

b) En segundo lugar, resulta necesario extrapolar la información hidrométrica proveniente de la estación de Acajutla a los puntos o secciones de cálculo, que en este caso coinciden con las secciones de cierre de las centrales hidroeléctricas en la cuenca del Sensunapán. Resulta posible realizar diversas aproximaciones en este sentido, pero la opción elegida en este caso de estudio es la extrapolación a partir de proporciones o ratios entre las cuencas vertientes a la estación de Acajutla y las cuencas vertientes a cada uno de los sitios de presa. Estos ratios serían de aplicación a los caudales registrados en la estación de Acajutla, obteniéndose unas nuevas series extrapoladas en los sitios de presa, que es donde se han aplicado los métodos hidrológicos de estimación de caudales ecológicos (Tabla 20).

Tabla 20. Ratios de área utilizados para la extrapolación de los caudales registrados en la estación de Acajutla a las secciones de estimación del caudal ecológico, en los sitios de presa de las centrales hidroeléctricas de la cuenca del río Sensunapán.

Sección	Acajutla	La Calera sitio de presa	San Francisco sitio de presa	Papaloate sitio de presa	Nahuizalco I sitio de presa en Papaloate	Nahuizalco I sitio de presa en Sensunapán
Área de la cuenca vertiente (km ²)	219.32	19	-	24.61	29.94	39.69
Proporción o ratio (%)	-	8.66	-	11.22	13.65	18.1
Área de la cuenca vertiente (km ²)	219.32	35.13	77.15	78.06	136.75	145.46
Proporción o ratio (%)	-	16.02	35.18	35.59	62.35	66.32

Aunque con anterioridad se ha hablado de métodos para el cálculo de caudales ecológicos se hará una clasificación específica dependiendo de los datos que se tienen y de la información pertinente para cada caso.

3.8. Métodos que definen un caudal mínimo continuo para todo el año.

Los métodos que no definen un régimen propiamente dicho, sino sólo un caudal mínimo fijo que servirá de límite inferior que no debe rebasarse.

Se han aplicado como base metodológica y contexto con el que comparar los resultados extraídos de la aplicación de los métodos variables, y especialmente de aquellos basados en la variabilidad natural del río. En particular se han empleado los siguientes métodos:

- *Métodos basados en el Q90*: se basan en el cálculo del percentil correspondiente de la curva de caudales clasificados y en la adopción de porcentajes del mismo como valores mínimos. Así, se tiene el 10 % del Q90 y el 20 % del Q90.
- *Métodos basados en el caudal medio anual (QMA)*: estos métodos fijan un valor mínimo que corresponde a un determinado porcentaje del caudal medio anual, como por ejemplo el método del 10 % del QMA, el método del 25 % del QMA y el método del 30 % del QMA.
- *Método ABF*: define el caudal ecológico como la media aritmética de los valores de la mediana de los caudales medios diarios del mes más desfavorable para la serie de datos; en el caso particular de la cuenca del Sensunapán, se trataría del mes de febrero.
- *Método Q25*: el caudal ecológico es la media de los valores mínimos anuales de las series de caudales medios de 25 días consecutivos.
- *Método de Hoppe*: este método no establece un único caudal propiamente dicho, sino 3 valores, cada uno de los cuales pretende garantizar las condiciones de vida para las especies piscícolas en sus diferentes estadios. Así, tenemos el Q17, Q40 y Q80, con los objetivos de regeneración del cauce, reproducción, alimento y refugio respectivamente.

3.9. Métodos que definen un caudal mínimo para cada mes.

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos de la aplicación de métodos que proporcionan un régimen de caudales, esto es, un caudal variable a lo largo del año, aunque sigue siendo tan solo un valor mínimo a mantener. Los métodos que se enmarcan en este apartado son los siguientes:

- *Método basado en el 30 % del caudal medio mensual (QMMi)*: el caudal ambiental para cada mes es un 30 % del valor medio mensual.

- *Método NGPRP*: los caudales ecológicos para cada mes son aquellos que son igualados o superados el 90 % del tiempo, una vez descartados los caudales extremos correspondientes a periodos húmedos o secos, y con la excepción de los meses de caudal más elevado, en que el valor mínimo se fija en el percentil 50.

En el caso que nos ocupa, se eliminaron en primer lugar los caudales excesivamente bajos o altos en cada mes, para lo cual se hizo uso de la disgregación en meses húmedos, medios y secos que proporciona la metodología de los Índices de Alteración Hidrológica (Martínez & Fernández Yuste, 2006) Posteriormente se definieron como meses de caudal elevado (en los que se empleará el percentil 50) aquellos en los que el caudal medio mensual supera el 75 % del caudal medio anual, que en este caso corresponde al periodo agosto, septiembre, octubre.

3.10. Métodos que proporcionan un régimen de caudales completo.

En este apartado se incluye el *Método del caudal básico de mantenimiento (QBM)* (Palau & Alcázar, 1996), que además de proporcionar un valor mínimo del que no se debe bajar en cada mes (Q_m), define un caudal generador (Q_g), un caudal máximo (Q_h) y una tasa de cambio (K). El valor base que emplea el método se calcula en base a una caracterización exhaustiva de los valores mínimos por periodos a través de las medias móviles para duraciones de 1 a 100 días. Se obtiene así el caudal básico (Q_b), que es el mínimo absoluto a mantener en el cauce.

A este caudal se le puede sumar o restar un caudal de acondicionamiento (Q_a) si por alguna razón contrastada se mostrara inadecuado. Sumando Q_b y Q_a (en caso de que exista) y aplicando a la suma un factor de variabilidad temporal que refleje el régimen natural del río. Se obtiene el caudal de mantenimiento (Q_m), que será el mínimo que debe circular mensualmente por el cauce.

3.11. Métodos basados en la variabilidad natural del río.

Aquí se emplean métodos que abordan la definición del régimen ambiental de caudales desde un enfoque distinto. No se centran en el cálculo de unos valores fijos a mantener, sino que analizan la variabilidad natural del régimen de caudales del río y fijan unos parámetros que la describan.

En función de esos parámetros, se define un rango de valores en el que el gestor se puede mover dependiendo del nivel de compromiso con el mantenimiento del régimen natural que pueda permitirse, pero siempre teniendo en cuenta unos límites admisibles máximos.

Existen actualmente dos metodologías con bastantes similitudes que analizan magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasa de cambio de una serie de variables del régimen de caudales, aspectos admitidos como los de mayor significación ambiental por la comunidad internacional:

- Índices de alteración hidrológica (IAH) de Martínez & Fernández Yuste (2006): se basa en el análisis de 24 índices que comparan el estatus hidrológico actual con el natural y que se resumen luego en tres índices globales: uno para valores habituales, otro para avenidas y otro para sequías.

Los índices están comprendidos entre 0 y 1, y en función de su valor se definen 5 estatus hidrológicos: excelente, bueno, moderado, deficiente y muy deficiente. Tiene también la característica reseñable de disgregar primero la serie en años y meses húmedos, medios y secos, lo que permite afinar en el análisis y la planificación posterior.

- *Rango de variabilidad natural (RVA)* de Richter (1996): este método analiza un total de 33 parámetros y de 34 componentes del régimen ambiental, y al igual que el anterior, compara sus valores actuales con los que presenta o presentaba el régimen natural. Basado en ese régimen original, establece un rango de variabilidad natural (RVA, range of variability approach) en el que los caudales ambientales deberían moverse para conservar los rasgos más significativos e influyentes para la dinámica del ecosistema.

Este RVA está definido en principio por los percentiles 33 y 67 de la distribución de caudales para cada mes (aunque también se ha calculado el rango fijado por los percentiles 25 y 75).

En función de este rango se establecen tres categorías: una central, que es la definida por los propios límites del RVA, una superior, para los valores que caen en los percentiles superiores, y otra inferior, para los valores que se sitúan en los percentiles inferiores al 33.

Estos métodos suponen una aproximación al régimen ambiental mucho más integradora que los procedimientos expuestos en apartados anteriores. Finalmente se ha seleccionado el método RVA, por la versatilidad de sus resultados desde el punto de vista de la gestión, y se han contrastado después sus resultados con los obtenidos anteriormente. (MARN, 2016)

3.12. Resultados.

La Tabla 21 recoge los resultados de la aplicación de los métodos hidrológicos que definen un caudal continuo para todo el año.

Como puede observarse, al tratarse de métodos que no tienen, salvo excepciones, una buena base ecohidrológica, y haber sido diseñados por diversos autores en muy diferentes regiones, ofrecen resultados notablemente dispersos. Tomando como referencia la estación de Acajutla, se observa que varios de estos métodos proponen un caudal ecológico en el rango 1.0-1.5 m³/s.

Tabla 21. Valores de los métodos de caudal mínimo continuo (m³/s) Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos (MARN, 2016)

Sección	10%Q90	20%Q90	10%QMA	25%QMA	30%QMA	ABF	Q25	Q17	HOPPE	
									Q40	Q80
Acajutla	1.06	2.12	0.56	1.41	1.69	1.37	1.24	8.35	5.41	1.54
La Calera sitio de presa	0.09	0.18	0.05	0.12	0.15	0.12	0.11	0.72	0.47	0.13
Papaloate sitio de presa	0.12	0.24	0.06	0.16	0.19	0.15	0.14	0.94	0.61	0.17
Nahuizalco I sitio de presa en Papaloate	0.14	0.29	0.08	0.19	0.23	0.19	0.17	1.14	0.74	0.21
Nahuizalco I sitio de presa en Sensunapán	0.19	0.38	0.1	0.25	0.31	0.25	0.22	1.51	0.98	0.28
Nahuizalco II sitio de presa	0.38	0.76	0.2	0.5	0.6	0.49	0.44	2.97	1.93	0.55
Bululú sitio de presa	0.66	1.32	0.35	0.88	1.05	0.85	0.77	5.21	3.37	0.96
Sonsonate sitio de presa	0.7	1.4	0.37	0.93	1.12	0.91	0.82	5.54	3.59	1.02

Por su parte, la Tabla 22 ofrece los resultados de la aplicación de los métodos basados en la estimación de un caudal mínimo mensual (30 % QMM y NGPRP). Tomando de nuevo como referencia el caso de la estación de Acajutla, estos métodos propondrían la aplicación de un régimen que oscila entre los 0.4-0.8 m³/s en febrero (mes más desfavorable), hasta los 3.35-8.99 m³/s de septiembre (mes más favorable). El método NGPRP sugiere la descarga de valores especialmente elevados en los meses de agosto, septiembre y octubre.

Tabla 22. Valores mensuales de caudales proporcionados por los métodos de caudal mínimo mensual. Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos (MARN, 2016)

Sección	Método	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr
Acajutla	30%QMM	1.31	2.61	2.34	2.89	3.35	2.90	1.27	0.54	0.47	0.44	0.43	0.62
	NGPRP	2.65	7.09	4.78	7.48	8.99	8.90	1.42	1.13	0.98	0.82	0.75	0.90
La Calera sitio de presa	30%QMM	0.11	0.20	0.23	0.25	0.29	0.25	0.11	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05
	NGPRP	0.23	0.46	0.41	0.65	0.78	0.77	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.08
Papaloate sitio de presa	30%QMM	0.15	0.29	0.26	0.32	0.38	0.33	0.14	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07
	NGPRP	0.30	0.59	0.54	0.84	1.01	1.00	0.16	0.13	0.11	0.09	0.08	0.10
Nahuizalco I sitio de presa en Papaloate	30%QMM	0.18	0.36	0.32	0.39	0.46	0.40	0.17	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08
	NGPRP	0.36	0.72	0.65	1.02	1.23	1.21	0.19	0.15	0.13	0.11	0.10	0.12
Nahuizalco I sitio de presa en Sensunapán	30%QMM	0.24	0.47	0.42	0.52	0.61	0.53	0.23	0.10	0.09	0.08	0.08	0.11
	NGPRP	0.48	0.96	0.87	1.35	1.63	1.61	0.26	0.20	0.18	0.15	0.14	0.16
Juayúa sitio de presa	30%QMM	0.21	0.42	0.37	0.46	0.54	0.47	0.20	0.09	0.08	0.07	0.07	0.10
	NGPRP	0.42	0.85	0.77	1.20	1.44	1.43	0.23	0.18	0.16	0.13	0.12	0.14
Cucumacayán sitio de presa	30%QMM	0.46	0.92	0.82	1.02	1.18	1.02	0.45	0.19	0.17	0.15	0.15	0.22
	NGPRP	0.93	1.86	1.68	2.63	3.16	3.13	0.50	0.40	0.34	0.29	0.26	0.32
Nahuizalco II sitio de presa	30%QMM	0.46	0.93	0.83	1.03	1.19	1.03	0.45	0.19	0.17	0.16	0.15	0.22
	NGPRP	0.94	1.89	1.70	2.66	3.20	3.17	0.51	0.40	0.35	0.29	0.27	0.32
Bululú sitio de presa	30%QMM	0.81	1.63	1.46	1.80	2.09	1.81	0.79	0.34	0.30	0.27	0.27	0.38
	NGPRP	1.65	3.30	2.98	4.66	5.61	5.55	0.89	0.70	0.61	0.51	0.47	0.56
Sonsonate sitio de presa	30%QMM	0.87	1.73	1.55	1.91	2.22	1.93	0.84	0.36	0.31	0.29	0.28	0.41
	NGPRP	1.76	3.51	3.17	4.96	5.96	5.90	0.94	0.75	0.65	0.54	0.50	0.60

El método del caudal básico de mantenimiento ofrece ya un procedimiento dirigido a la extracción del régimen de caudales ecológicos a partir del análisis de tendencias de una serie hidrológica. Los resultados derivados de la aplicación de este método se ofrecen en la Tabla 23.

Como puede observarse, el método sugiere la conveniencia de aplicar un caudal ecológico de 0.96 m³/s en el mes de febrero, que sube hasta los 2.90 m³/s en el mes de septiembre. El método QBM propone, por tanto, la descarga de un caudal mínimo próximo a 1.0 m³/s en los meses más críticos para el río (de enero a marzo), que aumenta progresivamente hasta situarse en el entorno o por encima de 2.5 m³/s en los meses de junio a septiembre.

Por lo que respecta al método RVA, Tal y como se ha indicado en el apartado de métodos, se exponen los valores correspondientes a la mediana de los caudales mensuales, y los umbrales inferiores y superiores obtenidos a partir de la aplicación del rango 25-75 y 33-67, los resultados derivados de su aplicación se ofrecen en las Tabla 24 - Tabla 26 y en las Figura 21 - Figura 24.

Tabla 23. Valor del caudal básico (Qb) tras la aplicación del método QBM y valores mensuales del caudal de mantenimiento (Qm) en la estación de Acajutla. (MARN, 2016)

Sección	Qb	Qm											
		may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr
Acajutla	0.96	1.84	2.43	2.26	2.47	2.90	1.79	2.55	1.66	1.03	0.96	0.99	1.24
La Calera sitio de presa	-	0.16	0.21	0.20	0.21	0.25	0.16	0.22	0.14	0.09	0.08	0.09	0.11
Papaloate sitio de presa	-	0.21	0.27	0.25	0.28	0.33	0.20	0.29	0.19	0.12	0.11	0.11	0.14
Nahuizalco I sitio de presa en Papaloate	-	0.25	0.33	0.31	0.34	0.40	0.24	0.35	0.23	0.14	0.13	0.14	0.17
Nahuizalco I sitio de presa en Sensunapán	-	0.33	0.44	0.41	0.45	0.52	0.32	0.46	0.30	0.19	0.17	0.18	0.22
Juayúa sitio de presa	-	0.29	0.39	0.36	0.40	0.46	0.29	0.41	0.27	0.16	0.15	0.16	0.20
Cucumacayán sitio de presa	-	0.65	0.85	0.79	0.87	1.02	0.63	0.90	0.58	0.36	0.34	0.35	0.44
Nahuizalco II sitio de presa	-	0.65	0.86	0.80	0.88	1.03	0.64	0.91	0.59	0.37	0.34	0.35	0.44
Bululú sitio de presa	-	1.15	1.52	1.41	1.54	1.81	1.12	1.59	1.04	0.64	0.60	0.62	0.77
Sonsonate sitio de presa	-	1.22	1.61	1.50	1.64	1.92	1.19	1.69	1.10	0.68	0.64	0.66	0.82

La Tabla 24 se refiere a valores mensuales, mientras que las Tabla 25 y Tabla 26 se refieren a otros parámetros hidrológicos que pueden tener interés desde el punto de vista de la gestión hidrológica, ya que se refieren a eventos de elevada importancia sobre la ecología del río.

Se proponen los dos rangos 25-75 y 33-67 para habilitar la posibilidad de que el gestor seleccione uno u otro, en función de las posibilidades de manejo y control de los caudales.

Desde el punto de vista ecológico, se sugiere la adopción, como régimen de caudales ecológicos mínimos, del rango del P33, ya que es más conservador desde el punto de vista de la protección ambiental.

Como puede observarse en la Tabla 24, este umbral inferior P33 sugiere no bajar de 1.0 m³/s en ningún mes del año (especialmente en los de carácter más desfavorable, de diciembre a abril), e incrementar notablemente los caudales en los meses con mayores registros naturales (mayo a noviembre). Todos estos resultados se refieren a la estación de Acajutla.

Tabla 24. Límites superior e inferior del RVA para los caudales mensuales (m³/s) en la estación de Acajutla.

Mes	Caudal medio (m ³ /s)	Caudal mediano (m ³ /s)	Rango Inferior (P25)	Rango Superior (P75)	Rango Inferior (P33)	Rango Superior (P67)
may	4.56	4.16	2.90	5.95	3.50	5.27
jun	6.92	6.71	5.22	9.38	5.62	8.41
jul	6.60	6.60	5.08	8.90	5.46	7.90
ago	7.21	7.10	5.41	9.50	5.93	8.40
sep	8.87	8.46	5.76	12.40	6.50	10.60
oct	8.05	7.36	5.57	11.32	6.01	9.94
nov	3.70	3.70	1.88	5.60	2.27	5.03
dic	1.90	1.44	1.10	2.46	1.21	2.12
ene	1.76	1.39	0.99	2.20	1.11	1.87
feb	1.58	1.27	0.94	1.90	1.25	1.72
mar	1.75	1.34	0.89	2.01	1.04	1.78
abr	2.11	1.68	1.04	3.02	1.22	2.43

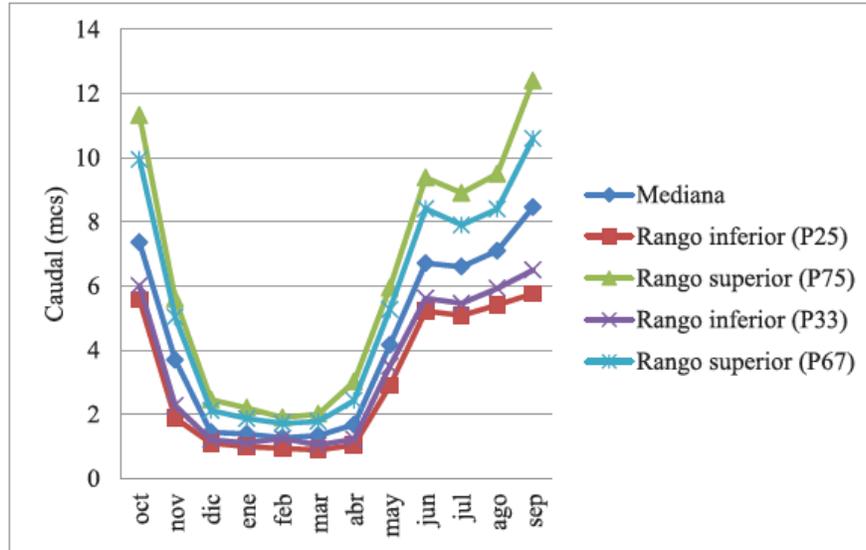
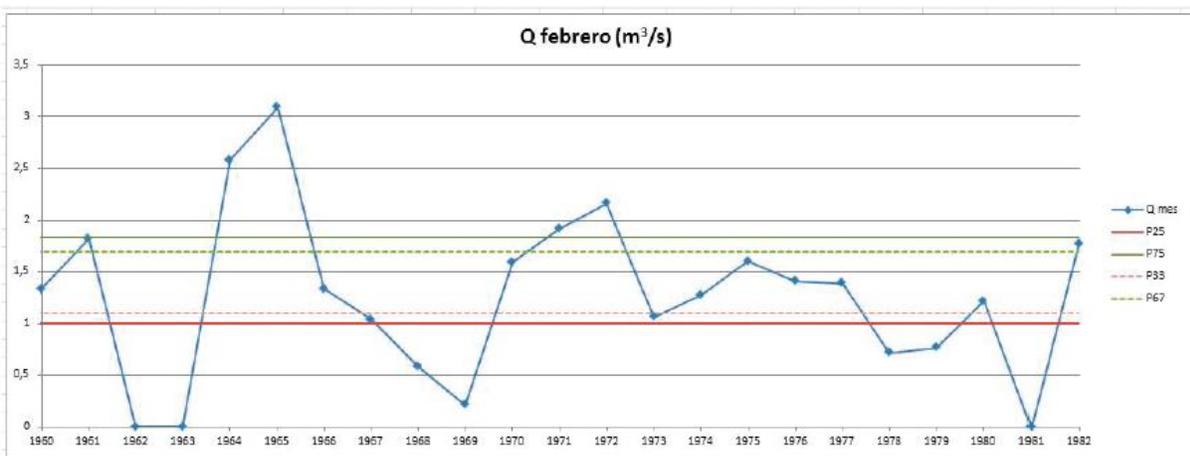
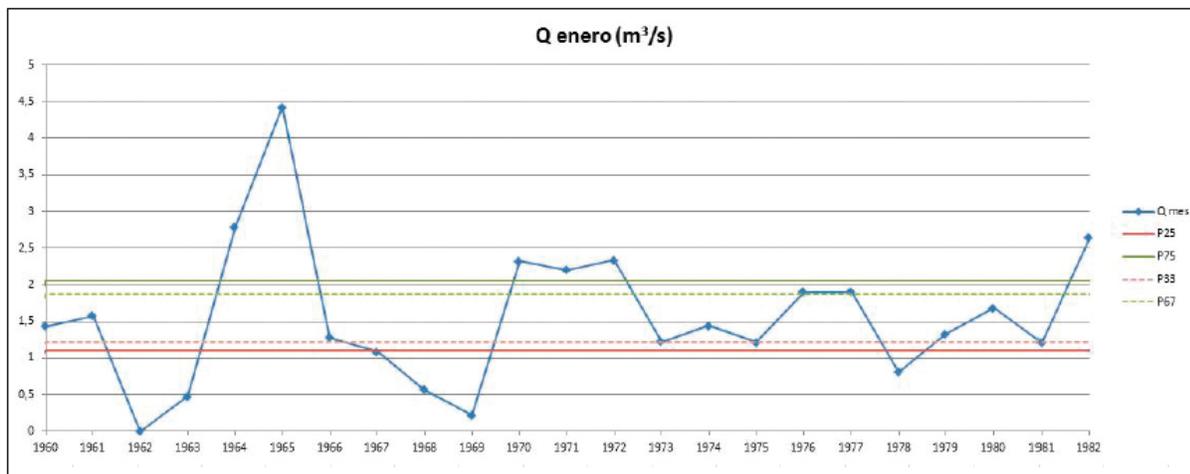


Figura 21 Representación gráfica de los valores medianos mensuales y de los rangos inferiores y superiores para cada mes tras la aplicación del método RVA.



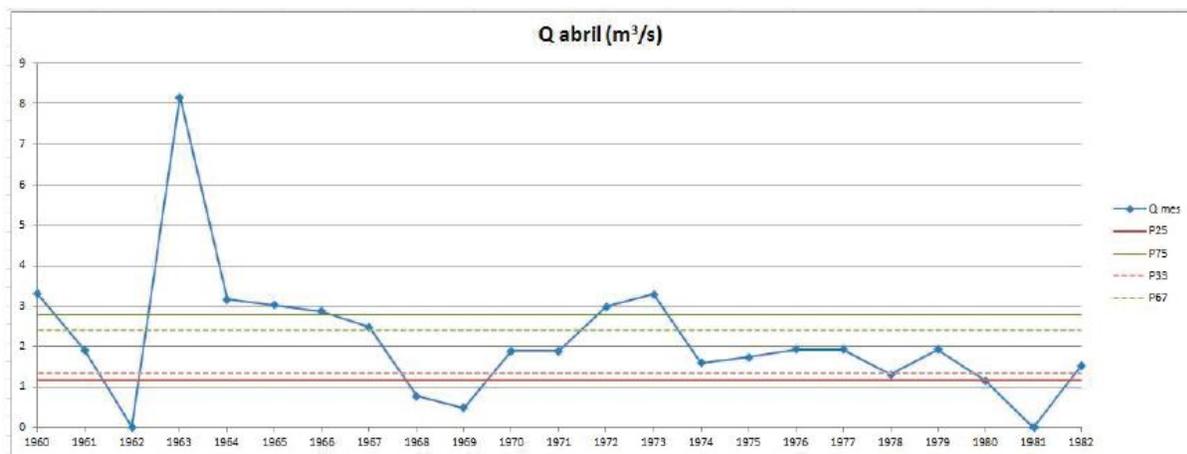
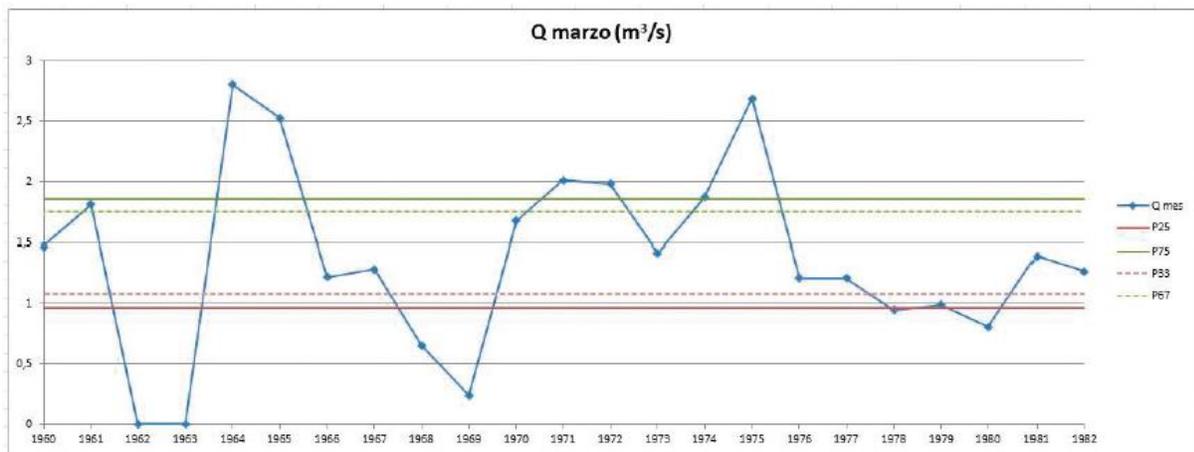
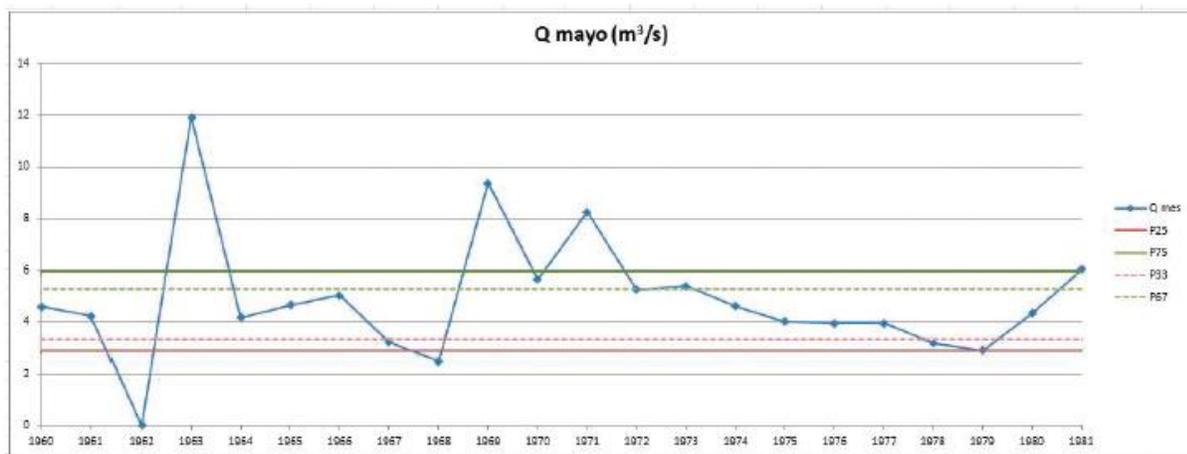


Figura 22. Representación gráfica de los rangos de variabilidad natural calculados para los meses de enero, febrero, marzo y abril en la estación de aforos de Acajutla.



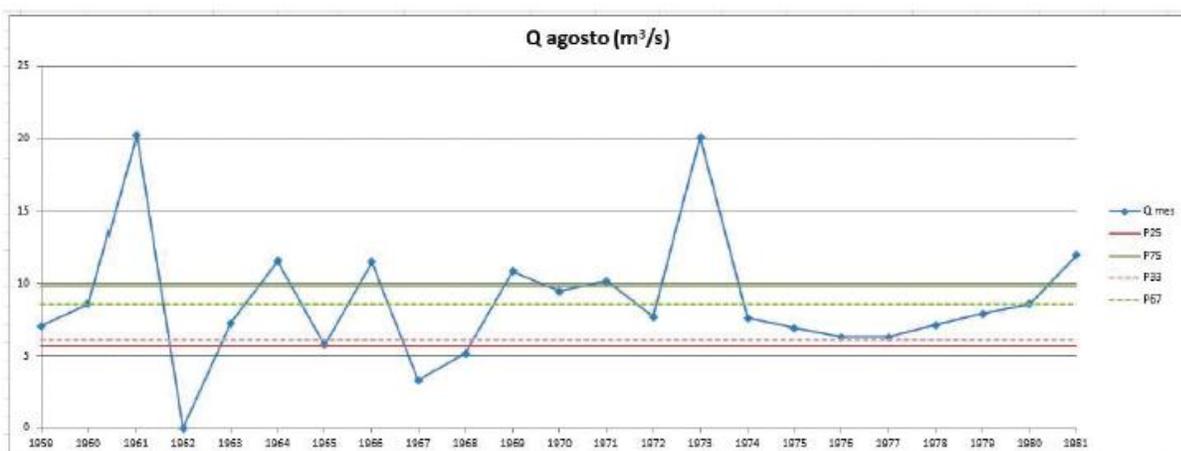
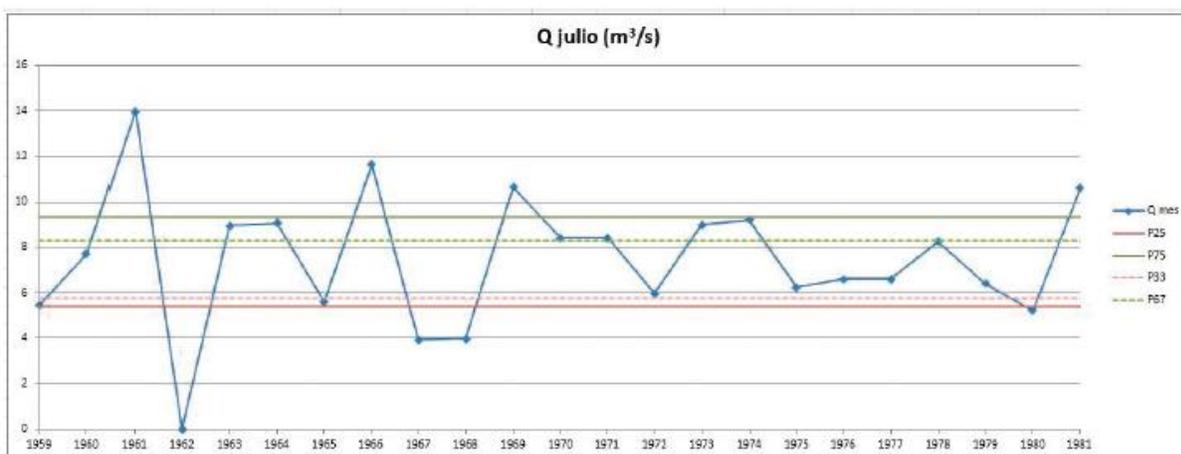
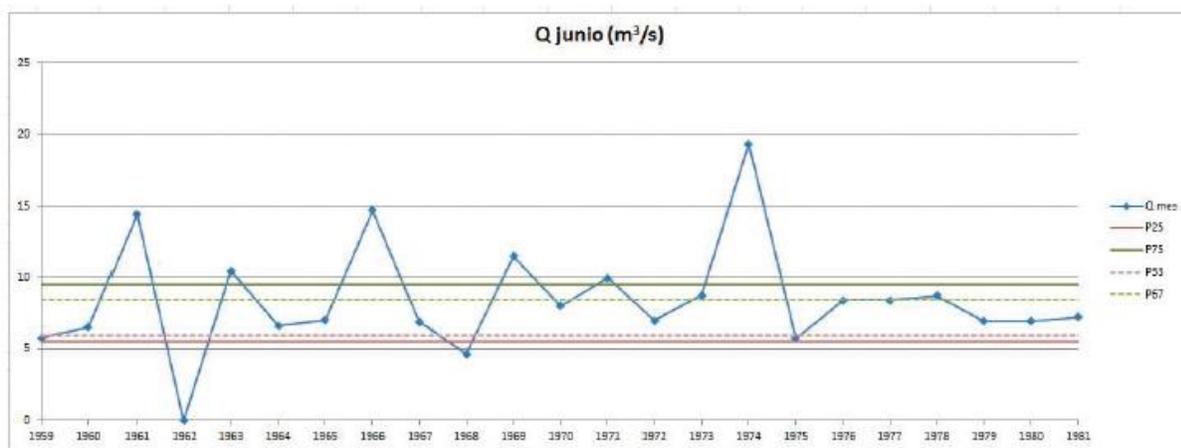
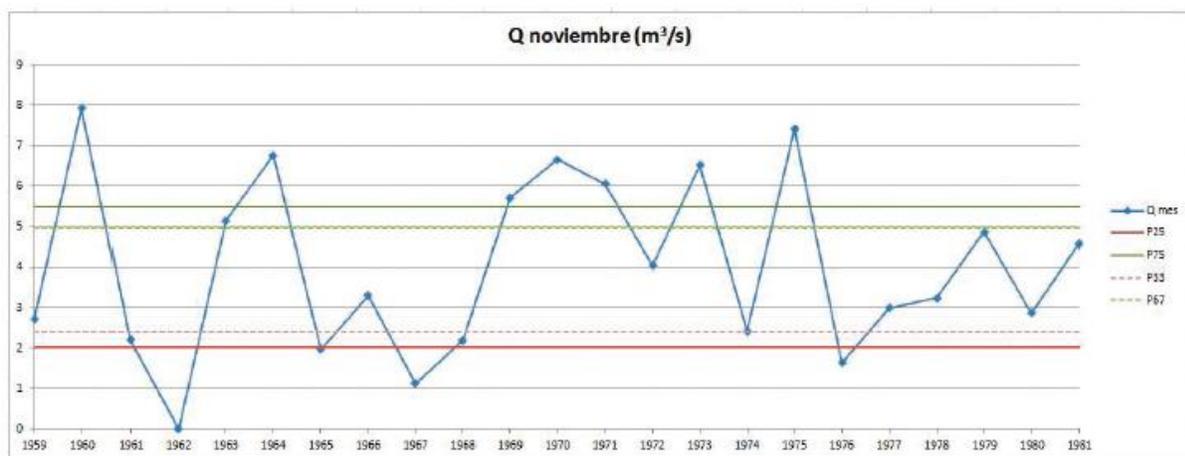
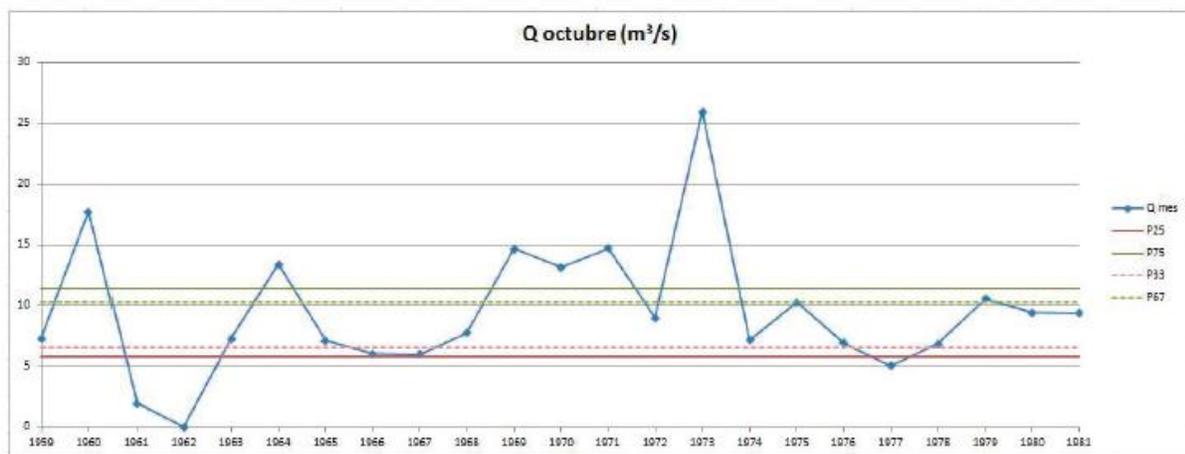
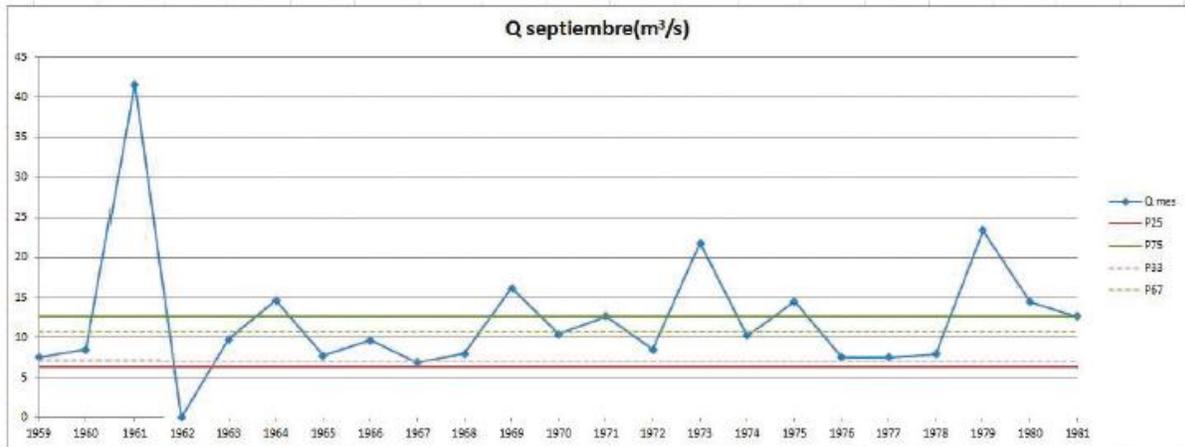


Figura 23. Representación gráfica de los rangos de variabilidad natural calculados para los meses de mayo, junio, julio y agosto en la estación de aforos de Acajutla.



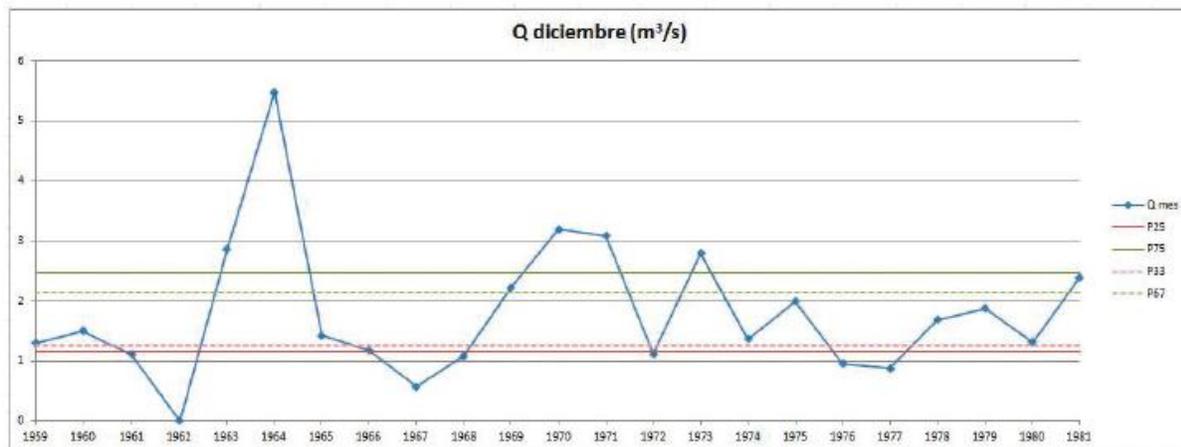


Figura 24. Representación gráfica de los rangos de variabilidad natural calculados para los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre en la estación de aforos de Acajutla.

Tabla 25. Mediana y límites superior e inferior del RVA para distintos máximos y mínimos anuales (m³/s) en la estación de Acajutla.

Parámetro	Mediana	Inferior (P25)	Superior (P75)
Mínimo de 1 día	0.71	0.42	1.08
Mínimo de 3 días	0.79	0.51	1.12
Mínimo de 7 días	0.92	0.54	1.24
Mínimo de 30 días	1.16	0.72	1.5
Mínimo de 90 días	1.29	0.92	1.7
Máximo de 1 día	42.64	22.09	74.76
Máximo de 3 días	25.99	16.81	41.49
Máximo de 7 días	20.8	13.59	26.49
Máximo de 30 días	14.18	9.78	15.97
Máximo de 90 días	9.46	7.61	12.36

Tabla 26. Límites superior e inferior del RVA para la frecuencia y duración de periodos de caudal alto y bajo (Número de días)

Parámetro	Mediana	Inferior	Superior
Días de caudal nulo	0	0	0
Fecha de caudal mínimo (Juliano)	34.5	75.5	98.5
Fecha de caudal mínimo máximo (Juliano)	227.5	249.5	276.5
Tasa de subida (Interdiaria)	0.24	0.3	0.4
Tasa de bajada (Interdiaria)	-0.37	-0.28	-0.24

Una vez estimado el rango de variabilidad ecológica en la estación de Acajutla, procede su extrapolación al resto de secciones de control, tal y como se hizo con el resto de métodos aplicados. En la Tabla 27 se ofrecen los valores resultantes de dicha extrapolación, relativos al umbral inferior P33.

Tabla 27. Caudales ecológicos mínimos en las secciones de control, derivados de la aplicación del umbral inferior P33 en el método RVA

Sección	Q ecológico mínimo – P33											
	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr
Acajutla	3.5	5.62	5.46	5.93	6.5	6.01	2.27	1.21	1.11	1.25	1.04	1.22
La Calera sitio de presa	0.3	0.49	0.47	0.51	0.56	0.52	0.2	0.1	0.1	0.11	0.09	0.11
Papaloate sitio de presa	0.39	0.63	0.61	0.67	0.73	0.67	0.25	0.14	0.12	0.14	0.12	0.14
Nahuizalco I sitio de presa en Papaloate	0.48	0.77	0.75	0.81	0.89	0.82	0.31	0.17	0.15	0.17	0.14	0.17
Nahuizalco I sitio de presa en Sensunapán	0.63	1.02	0.99	1.07	1.18	1.09	0.41	0.22	0.2	0.23	0.19	0.22
Juayúa sitio de presa	0.56	0.9	0.87	0.95	1.04	0.96	0.36	0.19	0.18	0.2	0.17	0.2
Cucumacayán sitio de presa	1.23	1.98	1.92	2.09	2.29	2.11	0.8	0.43	0.39	0.44	0.37	0.43
Nahuizalco II sitio de presa	1.25	2	1.94	2.11	2.31	2.14	0.81	0.43	0.4	0.44	0.37	0.43
Bululú sitio de presa	2.18	3.5	3.4	3.7	4.05	3.75	1.42	0.75	0.69	0.78	0.65	0.76
Sonsonate sitio de presa	2.32	3.73	3.62	3.93	4.31	3.99	1.51	0.8	0.74	0.83	0.69	0.81

Finalmente, y desde el punto de vista de la relación entre los caudales ecológicos mínimos propuestos y los caudales efectivamente fluyentes por el río en el periodo analizado, se ha considerado oportuno establecer el porcentaje de cumplimiento temporal de dichos caudales ecológicos, al menos en la estación de referencia de Acajutla.

En otras palabras, el porcentaje de veces en las que por causas naturales no se habría producido el caudal ecológico mínimo durante la serie hidrológica registrada. En estos casos, como se discutirá en el siguiente apartado, no resulta preciso forzar a que el sistema cuente con dicho caudal ecológico, sino que resulta suficiente con que se permita el paso del caudal natural.

Como puede observarse en la Tabla 28, los incumplimientos naturales rondaron el 20 % en el caso del umbral P25, y el 30 % en el caso del umbral P33.

Tabla 28. Porcentaje de días de cumplimiento de los rangos inferiores propuestos en el régimen de caudales ecológicos (P25 y P33) por cada uno de los meses, y porcentaje de cumplimiento anual en la estación de Acajutla

Meses	Porcentaje de cumplimiento	
	Rango Inferior (P25)	Rango Inferior (P33)
Mayo	78%	67%
Junio	82%	73%
Julio	82%	73%
Agosto	82%	73%
Septiembre	82%	73%
Octubre	77%	73%
Noviembre	78%	69%
Diciembre	80%	71%
Enero	79%	70%
Febrero	76%	53%
Marzo	76%	67%
Abril	78%	69%
Total general	79%	69%

3.13. Propuesta de metodología aplicable a proyectos nuevos sobre Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en El Salvador.

La selección de la metodología o metodologías más apropiadas para calcular el caudal ecológico para cada caso de estudio, depende de factores como; los objetivos de calidad y requerimientos técnicos establecidos, la adecuación a las características hidrológicas y ambientales del sistema fluvial objeto de análisis, la escala de trabajo y la cantidad y calidad de los datos disponibles (Parra, 2016).

En cualquier caso, es importante aplicar metodologías suficientemente contrastadas y validadas por la comunidad científica, de forma que los resultados que se deriven en cuanto al régimen de caudales aconsejado que permitan cumplir de forma efectiva con los objetivos ambientales perseguidos (Carreno, 2008).

En El Salvador se tomará como método de cálculo del caudal ecológico el método de Tennant, debido a su fácil aplicación, simplificado, requiere de pocos datos, económico y rápido.

Se ha sugerido además el IFIM que es una metodología de simulación más completa, que desarrolla procedimientos de muestreo de campo, minimiza tiempo y costos.

Tabla 29. Método de Tennant ó de Montana (WWF, 2010).

Criterio cualitativo para fijar caudales de reserva ecológica	Caudales recomendados	
	Octubre - Marzo	Abril - Septiembre
Máximo	200% del caudal medio	200% del caudal medio
Rango optimo	60% al 100% del caudal medio	60% al 100% del caudal medio
Excepcional o sobresaliente	40%	60%
Excelente	30%	50%
Bueno	20%	40%
Aceptable o en degradación	10%	30%
Mínimo o pobre	10%	10%
Degradación severa	<10%	<10%

Es importante recalcar que El Salvador cuenta con las estaciones siguientes: Invierno o estación lluviosa (mayo – octubre), Verano o estación seca (noviembre – abril)¹ Dado que este método es tan popular y sencillo de aplicar, varios investigadores han buscado la forma de modificarlo para poder integrarlo en el cálculo de caudales de otras regiones con características distintas a las del país de origen.

Tal es el caso del Estado de México, en donde bajo esta metodología se ha logrado determinar caudales como un rubro dentro de las Evaluaciones de Impacto Ambiental para proyectos hidráulicos.

En este método se calculan los caudales con base en los promedios anuales de los registros hidrométricos de por lo menos 10 años anteriores a la construcción de la central elegida. Asimismo, señala a la profundidad, la velocidad de la corriente y el ancho del cauce a nivel de la superficie libre del agua como las variables determinantes en el desarrollo de los organismos acuáticos y el buen estado de su hábitat.

Asimismo, indica que estos tres parámetros físicos se incrementan al aumentar el caudal y los cambios que experimentan son mayores a caudales bajos. El ancho, la profundidad y la velocidad de la corriente registran cambios notables en el intervalo que va de cero a 10% del caudal medio anual (Tabla 30). Tennant concluye que el 10% es el caudal mínimo necesario para garantizar la sobrevivencia de la mayor parte de las especies del río.

El empleo de gastos fluviales comprendidos entre el 30 y el 100% del gasto medio anual lo considera dentro de los criterios cualitativos para la determinación de los caudales ambientales como bueno y óptimo para el desarrollo de los organismos acuáticos.

¹Fuente: Estaciones climáticas de El Salvador <http://www.elsalvadmipais.com/estaciones-climaticas-de-el-salvador>

Finalmente, con el incremento del caudal fluvial de 100 a 200% del gasto medio anual lo considera como muy adecuados para el desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos (Tennant, 1976).

Tabla 30. Descripción cualitativa de caudales generada por Tennant (1976). Estudio Comparativo de Tres Metodologías para el Manejo y Cálculo de Caudales Ambientales en el Río Santiago, Nayarit, México. (Villega & Banderas, s.f)

Caudal Medio Anual (%)	Sustrato Húmedo (%)	Velocidad Media (cm s ⁻¹)	Profundidad Media (cm)	Criterio
10	60	24	30.5	Mínimo
30 - 100	40	46 - 61	46 - 61	Bueno y Óptimo
100 - 200	10	61 - 107	61 - 91	Excelente

Tabla 31. Caudal ecológico utilizando 10%QMA, 20%QMA, 40%QMA, 30%QMA Y 50%QMA Construcción propia, 2017

PCH	Qm Anual	Mínimo o pobre	Bueno		Excelente	
			Época seca	Época húmeda	Época seca	Época húmeda
		10%QMA	20%QMA	40%QMA	30%QMA	50%QMA
Acajutla	5.63	0.56	1.13	2.25	1.69	2.82
La Calera Sitio de presa	0.5	0.05	0.09	0.19	0.14	0.24
Papaloate Sitio de presa	0.6	0.06	0.13	0.25	0.19	0.32
Nahuizalco I Sitio de Presa en Papaloate	0.78	0.08	0.16	0.31	0.23	0.39
Nahuizalco I Sitio de Presa en Sensunapán	0.99	0.10	0.20	0.40	0.30	0.50
Nahuizalco II Sitio de Presa	1.94	0.2	0.39	0.78	0.6	0.97
Bululú Sitio de Presa	3.5	0.35	0.70	1.40	1.05	1.75
Sonsonate Sitio de Presa	3.68	0.37	0.74	1.47	1.10	1.84

Se han calculado los %QMA para tres escenarios distintos (Tabla 31) con el objetivo de tener un caudal ecológico adecuado, se puede justificar claramente que el recomendar un 10%QMA garantiza la sobrevivencia de la mayor parte de las especies del río.

Para tener un caudal ecológico bueno tendría que escogerse $0.74\text{m}^3/\text{s}$ para la estación seca y $1.47\text{m}^3/\text{s}$ para la estación lluviosa como mínimo.

Se propone la aplicación del 30 % del caudal medio anual (QMA) para la época seca y el 50 % del QMA para la época húmeda, que corresponden a $1.10\text{ m}^3/\text{s}$ y $1.84\text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Que los caudales ecológicos funcionen depende, en última instancia, de la **voluntad social, económica y política de las partes interesadas** ya que si la comunidad no está convencida de la necesidad de los caudales ecológicos, es improbable que se implementen.

Por supuesto que cuanto mejor sea la comprensión científica, mayor será también la probabilidad de que la comunidad se convenza, lo que hace del proceso de evaluación e implementación de caudales ecológicos una interesante combinación de ciencia y criterio de la sociedad (O'Keeffe & Le Quesne, 2010).

3.14. Metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology).

Se sugiere además el método IFIM porque se contemplan aspectos tan diversos como ingeniería hidráulica, biología, ecología y ciencias sociales, entre otras; lo cual la convierte en una de las metodologías más completas.

Experiencias del método: IFIM ha sido utilizada en Estados Unidos, España y en algunos países latinoamericanos como Colombia. Se dice que esta metodología es de tipo adaptativa, ya que los distintos modelos que la componen pueden ser combinados para adaptarse a distintos escenarios de análisis (Pizarro, 2004).

La metodología IFIM tiene como objetivo evaluar los efectos del cambio del caudal sobre determinado hábitat; por esta razón, simula las condiciones hidráulicas del micro hábitat por medio de un modelo computacional conocido como PHABSIM¹ (Physical Habitat Simulation Model), el cual calcula la profundidad del agua, velocidad y demás características del cauce que podrían verse afectadas. Este modelo fue diseñado para ser aplicado en el hábitat de los peces, por lo que requiere de mucha información para poder ser aplicado (Tharme, 1996).

¹ Descarga libre PHABSIM de: http://www.millereco.com/component/dms/view_document/1-phabsim-software/2-phabsim-installer

Al aplicar esta metodología también se toma en cuenta la afectación que puede haber sobre el macrohábitat estudiando la calidad del agua y controlando el aumento o disminución de la temperatura.

Una de las primeras decisiones que tiene que ser tomada antes de la aplicación de esta metodología es la selección de la o las especies.

Esto puede considerarse un problema dado que se debe dar prioridad a una especie por sobre las otras para preservarla; es por tal razón, muy importante recoger abundante información antes de su aplicación. Así también, se tendrá que tomar en cuenta los tramos del río en el que se encuentra la especie elegida. Cabe resaltar, que las decisiones tienen que ser tomadas con mucho cuidado, siempre considerando cuáles son los intereses que motivan la aplicación de la metodología.

La metodología IFIM cuenta con cinco o cuatro fases fundamentales, dependiendo de los autores (Ministerio de Obras Públicas, Chile. 1998).

Las 5 fases del IFIM son:

- ✓ Identificación y diagnóstico del problema: La cual consta de dos componentes principales:
 - a. Análisis legal e institucional para identificar el problema y el contexto más probable para su resolución.
 - b. Análisis de los intereses de las distintas partes involucradas en un problema y la información necesaria para resolverlo.

- ✓ Planificación del estudio: Un equipo multidisciplinario compara toda la información acumulada y debe llegar a un consenso sobre los objetivos, plazos de estudios, modelos apropiados e información requerida, presupuesto y responsabilidad para cada uno de los participantes.
- ✓ Implementación del estudio: Incluye la recopilación de los datos necesarios, la calibración de los modelos a utilizar, y la verificación de los resultados obtenidos.
- ✓ Análisis de alternativas: Se analizan las condiciones hidrológicas que definen un punto de referencia o línea base. Todos los participantes presentan alternativas de manejo del recurso hídrico.
- ✓ Resolución de problemas: Se analizan las distintas alternativas que se dieron a conocer en la fase anterior y se llega a un acuerdo sobre cuál es la más conveniente para aplicar. Todas las alternativas son examinadas para conocer: Efectividad, Factibilidad Física y Riesgo.

3.15. Ventajas y desventajas de Tennant e IFIM.

De todos los métodos descritos en el documento se resumen a continuación 2, se mencionan las ventajas y desventajas de acuerdo a la aplicabilidad en nuestro país.

Tabla 32. Comparación métodos Tennant e IFIM. Construcción propia

	Tennant	IFIM
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor grado de versatilidad en los métodos de cálculo. ✓ Facilidad de cálculo. ✓ Económicos en su aplicación. ✓ Rápidos de emplear; tiempos de trabajo de aproximadamente medio mes. ✓ La información que se requiere para su cálculo en la mayoría de casos existe y es de fácil acceso; registros hidrológicos. ✓ Registran el comportamiento histórico de las corrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permiten conocer la respuesta de una especie, normalmente piscícola, a la variación del caudal. ✓ Sirven como herramientas específicas de estudio para especies de flora y/o fauna. ✓ Interrelacionan las características hidráulicas y ecológicas de las corrientes bajo estudio. ✓ Permiten predecir las consecuencias de los cambios físicos sobre las comunidades hidrobiológicas; puede considerarse como una herramienta de evaluación de impacto.

Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Puesto que no tienen en cuenta el estudio de las características físicas y biológicas de las corrientes bajo estudio, ello implica que el Qe puede ser subvalorado o sobrevalorado de acuerdo con los requerimientos reales del ecosistema acuático; se asumen vínculos ecológicos. ✓ Proporcionan una estimación de caudales relativamente rápida, sin muchos recursos. ✓ Tennant fue desarrollado para sitios específicos así que su aplicación debe hacerse con precaución en regiones que difieren notablemente a las de origen. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limita los resultados a las especies bajo estudio; no se pueden generalizar resultados y la selección de la especie de estudio es crítica. ✓ Emplearlos como herramienta de planeación y conservación, por ejemplo, implicaría realizar estudios extensos y recurrentes. ✓ El uso de curvas de preferencia de las especies objetivo puede ser un problema puesto que en muchos países esta información no se encuentra disponible.
-------------	--	--

De acuerdo a las ventajas y desventajas se recomienda para el país el método de Tennant y un valor ecológico del 30 % del caudal medio anual (QMA) para la época seca y el 50 % del QMA para la época húmeda.

3.16. Pasos para la aplicación del método de Tennant.

- En este método se calculan los caudales con base en los promedios anuales de los registros hidrométricos de por lo menos 10 años.
- Los cálculos se basan en los caudales medios anuales (QMA).
- Se calculan los caudales durante los periodos noviembre-abril (estiaje) y Mayo-octubre (lluvias) de las zonas tropicales de El Salvador, periodos que generalmente presentan ligeras variaciones dependiendo de la región en consideración.
- La época de secas se define para los meses con valores de caudal menores al promedio anual, y la época de lluvias para los meses donde el promedio mensual del caudal es mayor al promedio anual.

- Se sugiere un porcentaje del 30% para los caudales ambientales mínimos recomendados en lugar del 10%.
- Deben de efectuarse análisis adicionales para calcular los caudales que mantienen y reparan el canal y/o modulan la calidad y la temperatura del agua.
- Deben ajustarse adecuadamente los problemas sociales, políticos y ambientales para no generar conflictos entre usuarios.

Conclusiones.

Más allá del resultado que se pueda obtener del cómputo del caudal ecológico, éste se debe establecer teniendo en cuenta el derecho de uso del agua entre los diferentes usuarios del recurso, sin discriminación alguna, es decir, se deben tener en cuenta usuarios que requieren el agua para consumo, para el desarrollo industrial, para el riego, generación de energía, recreación, cultura, y adicionalmente, el uso y necesidad de los recursos hidrobiológicos asociados a las corrientes y que dependen del agua (especies de flora y fauna).

En la determinación de caudales ecológicos se deben tener en cuenta aspectos hidrológicos, biológicos, de calidad del agua, económicos, sociales y culturales.

Durante el proceso de determinación del caudal ecológico el tipo de preguntas que han de prevalecer no deben direccionarse sobre cuál método emplear o cuál es mejor, puesto que cada uno de estos ha sido diseñado para responder a un caso particular, para unas características específicas o un propósito.

El cómputo del caudal ecológico no debe limitarse a su determinación sino adicionalmente a evaluar si su selección efectivamente cumple el propósito para el cuál fue desarrollado, por lo cual el seguimiento y monitoreo debe ser un factor preponderante para determinar el éxito o fracaso del proceso así como las medidas correctivas a que haya lugar.

En tramos de corrientes considerados frágiles, estratégicos o de importancia ambiental y/o socioeconómica, es preferible conservar el régimen natural de caudales o en su defecto establecer un caudal ecológico lo más alto posible y parecido al caudal normal de la corriente, El caudal ecológico por sí solo no es una medida eficiente en el manejo integrado de una cuenca hidrográfica.

Por el contrario éste ha de ser parte de una serie de medidas de manejo entre las cuales se pueden mencionar zonificaciones ambientales y de manejo, medidas de recuperación de suelos, prevención de la contaminación, conservación y protección de ecosistemas.

Se puede observar la variabilidad de los datos en los métodos utilizados y la necesidad de basarse en la determinación del régimen de caudal ecológico que cuente con un adecuado fundamento científico

para respetar la conservación de los valores y servicios ambientales del río, Los métodos aplicados oscilan entre los de carácter fijo anual (no adecuados por su escasa aproximación a la variabilidad hidrológica propia del río), los de carácter mensual definidos a partir de los valores mensuales de la serie, y aquellos que se basan en el análisis de tendencias a lo largo de toda la serie y de la variabilidad natural del río, que han sido finalmente seleccionados para definir el régimen de caudales ecológicos, se ha resaltado el componente de mínimos del régimen de caudales ecológicos, ya que otras componentes habituales en la definición de este tipo de regímenes, como es el caso de las crecidas generadoras, no son de aplicación en el caso de estudio, al no existir en la cuenca estructuras de regulación que posibiliten la descarga controlada de crecidas.

La carencia de datos ambientales y ecológicos en la cuenca ha impedido el ajuste de los resultados de los métodos hidrológicos con los derivados de la utilización de métodos de tipo biológico. Por ello, los resultados propuestos deben entenderse como una primera aproximación a las demandas ambientales de los ecosistemas, que deben ser ajustados y revisados cuando se tengan datos ecológicos de las especies de fauna y flora existentes en el río Sensunapán.

Por otra parte, la calidad de la serie hidrológica resulta determinante en la evaluación de los resultados. Por ello, sería recomendable revisar dichos resultados cuando se cuente con nuevas informaciones hidrométricas, de mayor longitud temporal y más próxima en el tiempo a los escenarios definidos para la gestión del agua y los ecosistemas fluviales, Los resultados obtenidos identifican umbrales que no deben ser rebasados para evitar la acumulación de un estrés hídrico fuerte en los ecosistemas fluviales. Esto no significa que la ocurrencia de caudales inferiores en el río, debidos a causas naturales, suponga un problema para la salud del ecosistema. Al contrario, estos caudales son indispensables para el correcto funcionamiento de la dinámica fluvial.

Por ello, los caudales ecológicos mínimos en el río deberían aproximarse a los propuestos en este documento, salvo en los casos en los que naturalmente fluya menos caudal por el río, en cuyo caso estos caudales naturales serían los caudales “ecológicos” mínimos del río.

Otros incumplimientos en los caudales ecológicos propuestos, debidos a la explotación de la cuenca, serían admisibles siempre y cuando no supongan un porcentaje elevado de los casos totales, y no

generen situaciones de estrés fuerte o prolongado en el río. A efectos de la gestión, en diferentes cuencas hidrográficas del mundo se aplican distintos niveles de garantía temporal (incumplimientos máximos) del caudal ecológico. Estos niveles deben ser estudiados y propuestos por los gestores del recurso en la República de El Salvador, teniendo en cuenta las particularidades de la gestión y manejo de los ríos en la cuenca del Sensunapán.

Por lo que respecta a los objetivos ambientales de la descarga de un régimen de caudales ecológicos, debe recordarse que dichos objetivos están estrechamente ligados a la existencia de un adecuado nivel de calidad de las aguas en el río, ya que esta calidad puede reducir de manera significativa la integridad del ecosistema.

La ausencia de valores mínimos de calidad impide que el caudal ecológico asegure el mantenimiento de la salud del ecosistema. Por ello, sería del máximo interés profundizar en el conocimiento de la interacción entre la cantidad y calidad de las aguas en el río, con el fin de avanzar en la consecución de valores acordes con los requerimientos sociales y ambientales de los diferentes componentes del sistema fluvial.

Desde la perspectiva específica de la gestión de las centrales hidroeléctricas, conviene recalcar la necesidad de plantear el problema de los caudales ecológicos mínimos de forma global en la cuenca y no solo sobre las dos centrales que aún no han entrado en funcionamiento, pues actuando solo en una central se beneficiará exclusivamente un tramo reducido de río afectado por esa derivación, persistiendo el problema en el resto.

Esto resulta especialmente complicado en la cuenca del Sensunapán, puesto que existen cinco concesionarios diferentes, de manera que solo dos centrales consecutivas, Bululú y Sonsonate, pertenecen al mismo titular.

No obstante a lo anterior, es razonable empezar a resolver el problema de manera gradual, comenzando por establecer un régimen de caudales ecológicos mínimos en las centrales cuya tramitación del permiso ambiental resulte más urgente. Ello permitirá comprobar la viabilidad de su aplicación y de su control real. Otra consideración de carácter general es asegurarse de que cuando la central no está

funcionando, no se produce la derivación. Es decir, garantizar que siempre que el caudal circulante por el río no supera el caudal mínimo de la turbina más pequeña de la central, todo el caudal debe seguir circulando por el río.

La implementación de los regímenes ecológicos obliga a la realización de un análisis exhaustivo de las implicaciones sociales y ambientales de las diferentes propuestas, contando con los agentes y actores de la cuenca.

Una participación pública efectiva puede conllevar una mayor garantía de aplicación, y la consecución de los múltiples objetivos planteados al establecer el régimen ecológico. En este sentido, y de cara a la concertación de los caudales determinados, resulta importante considerar la incorporación de nuevos agentes sociales relacionados con la gestión del agua, más allá de los habitualmente considerados o de los más relevantes desde la perspectiva de la demanda.

El análisis de las implicaciones sociales y ambientales de la implantación de regímenes ecológicos debe también considerar la hipótesis de no aplicación de estos caudales, de manera que sea posible establecer una comparación integrada de diversos escenarios de gestión.

De cara a este análisis comparado, resultaría recomendable considerar las consecuencias que sobre la cantidad y calidad del agua tendrían cada uno de esos escenarios, para los diferentes usuarios de los sistemas fluviales y para las comunidades biológicas que sustentan dichos sistemas o que estarían en condiciones de sustentar cuando se mitiguen las alteraciones hidromorfológicas y físico-químicas de las aguas.

Referencias bibliográficas.

- Alcazar. M (2007). El método de caudal básico para la determinación de caudales de mantenimiento aplicación a la Cuenca del Ebro.
Recuperado de:
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8236/Tjam1d1.pdf?sequence=1>
- APROMA (Asociación Profesionales del Medio Ambiente). 2000. 1º Congreso sobre Caudales Ecológicos. Ponencias y conclusiones. Barcelona. 407 pp.
- Cachón, J. (2003). Régimen ambiental de caudales. Puesta en práctica en España: problemas, requerimientos y propuesta de soluciones. Actas del Curso “Régimen Ambiental de Caudales”. UIMP, Cuenca.
- Consuegra M. (2013). SÍNTESIS METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS (Q_e), RESULTADOS Y POSIBLES CONSECUENCIAS.
Recuperado de:
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/75/1/DOCUMENTO%20-%20FINAL.pdf>.
- CNE. (2012). Proyecto del Plan Maestro para el Desarrollo de Energías renovables. Recuperado de:
http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=41:pmer&Itemid=63.
- Erazo, A. (2004). Regionalización de caudales máximos y medio en El Salvador. Recuperado de:
<http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/caudales.pdf>
- G. Vilchez (s.f). Iº Symposium Internacional sobre Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas.
Recuperado de: <http://minagri.gob.pe/portal/datero/55-sector-agrario/hidrologia/381-problematika>
- Hirji & Davis. (2009). Caudales ecológicos. Recuperado de:
http://www.bdigital.unal.edu.co/9163/1/71194057.2013._Parte1.pdf
- King & Louw. (1998); Palau. (1994); Dysonet al. (2003). Estrategias para la determinación de caudales ambientales.
Recuperado de: http://www.cohife.org/OLD/documentos/PDornes_Taller.pdf
- Magdaleno, F. (2005). Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones. Recuperado de:
<http://www.casadellibro.com/libro-caudales-ecologicos-conceptos-metodos-e->

interpretaciones/9788477904106/1043622

Magdaleno, F. (2009). Manual técnico de cálculo de caudales ambientales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 240 pp.

MARN. (2013). Elaboración del plan nacional de gestión integrada del recurso hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas prioritarias.
Recuperado de: <http://agua.marn.gob.sv/Documentos/prueba/PNGIRH-DTR-TTE-016-Qeco-E01-MESA.pdf>

MARN. (2016-2017). Condiciones hidrológicas mensuales Año hidrológico 2016-2017. Recuperado de:
<http://www.snet.gob.sv/ver/hidrologia/monitoreo+hidrologico/condiciones+hidrologicas/2016+-+2017/>

MARN. (2016). Elaboración de una metodología para el cálculo de caudales ecológicos.
Recuperado de:
<http://www.marn.gob.sv/sistema-de-evaluacion-ambiental-3/>

Martín Mayo, R. (2000). Determinación de Regímenes de Caudales Ecológicos Mínimos, Adaptación del Método IFIM-PHABSIM y Aplicación a Los Ríos Españoles. Recuperado de:
<http://oa.upm.es/667/1/07200013.pdf>

Martínez Valdés, Y. (2017). Discurso Ceremonia de Inauguración I Taller Nacional de Caudales Ecológicos y Ambientales.
Recuperado de:
http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Havana/Discurso_Yaset_Taller_Caudales.pdf

O’Keeffe & Le Quesne. (2009). Cómo conservar los ríos vivos Guía sobre los caudales ecológicos, Serie Seguridad Hídrica de WWF 2. Recuperado de:
<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:YkOt8Kchzu0J:https://www.agua.org.mx/biblioteca/como-conservar-los-rios-vivos-guia-sobre-los-caudales-ecologicos/+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=sv>

PAMPAGRASS, S.A. (2010). Guía para el desarrollo de proyectos de energía renovable en El Salvador. Recuperado de:
<http://energiasrenovables.cne.gob.sv/downloads/GuiaParadesarrollodeproyectosenElSalvador.pdf>

Parra Rodríguez, E. A. (2012). Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales.

- Recuperado de: http://www.bdigital.unal.edu.co/9163/1/71194057.2013._Parte1.pdf
- SNET. (2005). Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador Componente Evaluación de Recursos Hídricos. Recuperado de: <http://www.snet.gob.sv/Documentos/balanceHidrico.pdf>
- SNET. (2009). Calidad Del Agua. Recuperado de:
<http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/Documentos/CalidadAgua2009.pdf>
- UNESCO. (2014). Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay. Recuperado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002277/227701S.pdf>
- UNESCO. (s.f). Proyecto fortalecimiento de capacidades en los sistemas de alerta temprana, SAT, en américa central, desde una perspectiva de multiamenaza VII plan de acción DIPECHO/ECHO UNESCO-CEPREDENAC. Recuperado de:
http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/San-Jose/pdf/Propuesta_fortalecimiento_SAT2013_2.pdf
- USAID/MARN. (2009). Propuesta de Plan de Manejo de la Subcuenca Río Grande de Sonsonate. Recuperado de:
[http://agua.marn.gob.sv/Documentos/Estudios/Grandesonsonate/PlanManejoSubcuencaGrandeSonsonate\(Sensunapan\).pdf](http://agua.marn.gob.sv/Documentos/Estudios/Grandesonsonate/PlanManejoSubcuencaGrandeSonsonate(Sensunapan).pdf)
- Vélez & Ríos. (2004). Seminario Internacional Sobre Eventos Extremos Mínimos en Regímenes de Caudales: Diagnóstico, Modelamiento y Análisis. Recuperado de:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/4336/1/DA3751.pdf>
- Villela & Banderas(s, f). Estudio Comparativo de Tres Metodologías para el Manejo y Cálculo de Caudales Ambientales en el Río Santiago, Nayarit, México. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/profile/Rebeca_Villela/publication/242587335_Estudio_Comparativo_de_Tres_Metodologias_para_el_Manejo_y_Calculo_de_Caudales_Ambientales_en_el_Rio_Santiago_Nayarit_Mexico/links/54b535940cf26833efd079d5/Estudio-Comparativo-de-Tres-Metodologias-para-el-Manejo-y-Calculo-de-Caudales-Ambientales-en-el-Rio-Santiago-Nayarit-Mexico.pdf?origin=publication_detail
- WWF. (2010). Guía sobre los caudales ecológicos. Recuperado de:
http://www.agua.unam.mx/humedales/assets/materialdifusion/WWF_ComoConservarLosRiosVivos.pdf
- Zeus, R. (2006). Aplicación del método IFIM como modelamiento para determinar el caudal ecológico en la cuenca del río Chancha mayo. *Revista ambiental*, 6(4).50-51